

**DEMİRYOLU ARAÇLARINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİNİ ARTTIRMAK İÇİN
OPTİMUM YALITIM KALINLIĞININ NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

Mustafa DÖNMEZ

Yüksek Lisans Tezi

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Mete ÖZTÜRK

(İkinci Danışman: Doç. Dr. Bahadır DOĞAN)

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Şubat 2023

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Mustafa DÖNMEZ'in DEMİRYOLU ARAÇLARINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİNİ ARTTIRMAK İÇİN OPTİMUM YALITIM KALINLIĞININ NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ başlıklı çalışması 10/02/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Doç. Dr. M. Mete ÖZTÜRK

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Çisil TİMURALP

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Fatih BOZKURT

Prof. Dr. Murat TANIŞLI

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

10/02/2023

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Mustafa DÖNMEZ, DEMİRYOLU ARAÇLARINDA ENERJİ VERİMLİLİğİNİ ARTTIRMAK İÇİN OPTİMUM YALITIM KALINLIğININ NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Doç. Dr. Mehmet Mete ÖZTÜRK

ÖZET

DEMİRYOLU ARAÇLARINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİNİ ARTTIRMAK İÇİN OPTİMUM YALITIM KALINLIĞININ NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Mustafa DÖNMEZ

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Şubat 2023

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Mete ÖZTÜRK

(İkinci Danışman: Doç. Dr. Bahadır DOĞAN)

Ulaşımda enerji verimliliği, son yıllarda ortaya çıkan ve büyüyerek devam eden enerji krizi nedeniyle üzerinde çalışılması gereken bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca işletme sırasında kullanılan fosil yakıtlardan kaynaklanan ve çevreye olumsuz etkileri olan CO₂ salınımının düşürülebilmesi için enerji tüketimini azaltabilecek sistemler geliştirilmektedir. Önemi ve kullanımı her geçen gün artan demiryolu yolcu taşımacılığında gelişen teknoloji ile birlikte yolcuların konfor şartları sürekli iyileştirilmektedir. Konfor şartlarını sağlayan iklimlendirme sistemleri için kullanılan enerji, trenin tüketilen toplam enerji miktarının yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır.

Bu çalışmada yolcu taşımacılığında kullanılan vagonların ısı kaybını azaltabilmek için kullanılan yalıtım malzemesinin kalınlığı ve çeşidinin trenin enerji tüketimine olan etkisi araştırılmıştır. Tren zarfının incelenebilmesi için yapı bölümlere ayrılarak modellenmiştir. Belirlenen bölümler farklı yalıtım malzemesi kalınlıklarında oluşturulmuştur. Yalıtım malzemesi çeşitleri tanımlanarak parametrik bir analiz yapılmıştır. Tren zarfının enerji tüketimine etkisini görebilmek için analizler yaz ve kış koşullarında farklı sıcaklıklarda değerlendirilmiştir. Analizler için ticari bir yazılım olan ANSYS kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen veriler karşılaştırma yapılabilecek şekilde hazırlanmıştır. Malzemenin ısı iletim katsayısının azalmasının ve kalınlığının artması ile enerji tüketiminin azalması arasındaki ilişki, yapılan hesaplamalar ile birlikte sunulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Tren zarfı, Yalıtım malzemesi, Nümerik analiz, Raylı sistemler, Enerji verimliliği.

ABSTRACT

NUMERICAL INVESTIGATION OF OPTIMUM INSULATION THICKNESS TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY IN RAILWAY VEHICLES

Mustafa DÖNMEZ

Department of Railway System Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, February 2023

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Mete ÖZTÜRK

(Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Bahadır DOĞAN)

The energy efficiency is one of the hot topic in transportation across the World due to the energy crisis emerges in last decades. Furthermore, the rising environmental concern leads the researchers to improve the recent systems in order to descend the energy consumption which would help the reduction of CO₂ release during operation.

Rail transportation has an unavoidable role in passenger transportation all around the World. And HVAC has a major importance for a comfort ride for the passengers during their travel. It solely consumes almost %30 of the total energy per travel in railways.

In this particular work, the effect of the thickness and type of insulation material which is used to reduce the heat loss of the passenger cars in rail transportation was investigated. In order to examine the train envelope, the structure was modeled by dividing it into sections. The specified sections are formed in different insulation material thicknesses. A parametric analysis was made by defining the types of insulation materials. In order to see the effect of the train envelope on energy consumption, the analyzes were evaluated at different temperatures in summer and winter conditions. ANSYS, a commercial software, was used for the analysis.

Keywords: Train envelope, Insulation material, Numerical analysis, Railway, Energy efficiency.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının seçiminde, yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçların değerlendirilmesinde bilgisi, tecrübesi, sabrı ve yardımları ile beni yönlendiren, değerli vaktini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet Mete ÖZTÜRK' e saygı, şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her alanında olduğu gibi, tez çalışmamı hazırlarken de bana yardımcı olan sevgili eşim Meltem Elif DÖNMEZ'e sonsuz teşekkür ederim.

Mustafa DÖNMEZ

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Mustafa DÖNMEZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Dünyada Demiryolu Ulaştırması	2
1.2. Türkiye’de Demiryolu Ulaştırması.....	6
1.3. Demiryolu Taşımacılığının Avantajları ve Dezavantajları	7
2. RAYLI SİSTEM ARAÇLARI İLE İLGİLİ YAPILAN ENERJİ VERİMLİLİĞİ ÇALIŞMALARI.....	9
2.1. Literatür Taraması	9
2.2. Motivasyon.....	14
3. DEMİRYOLU ARAÇLARININ SINIFLANDIRILMASI, ARAÇ TİPLERİ VE EKİPMAN ÇEŞİTLERİ	15
3.1. Demiryollarında Yolcu ve Yük Taşımacılığında Kullanılan Çeken ve Çekilen Araç Tipleri	15
3.1.1. Yüksek hızlı tren.....	15
3.1.2. Maglev treni	16
3.1.3. Konvansiyonel raylı sistem	16

3.1.3.1. <i>Yük vagonları</i>	16
3.1.3.2. <i>Yolcu vagonları</i>	17
3.1.4. Kent içi raylı sistemler	19
3.1.4.1 <i>Metro</i>	19
3.1.4.2 <i>Hafif raylı sistemler ve tramvaylar</i>	20
3.1.4.3 <i>Monoray</i>	20
3.3 Raylı Sistem Araçları Aydınlatma Ve İklimlendirilme Sistemleri	25
3.3.1 Raylı sistemlerde aydınlatma	26
3.3.2 Raylı sistemlerde iklimlendirme	26
3.3.2.1 <i>Raylı sistemlerde soğutma</i>	26
3.3.2.2 <i>Raylı sistemlerde kullanılan klimalar</i>	28
3.3.2.3 <i>Raylı sistemlerde ısıtma</i>	29
4. NÜMERİK ANALİZ PARAMETRELERİ VE MODELLEME	30
4.1. Vagon Zarf Yapısının İncelenmesi	30
4.2. Vagon Zarf Yapısının Farklı Yalıtım Malzemesi ve Farklı Yalıtım Kalınlıklarına Göre Modellenmesi	31
4.3. Nümerik analiz için parametrelerin belirlenmesi	32
5. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	36
5.1. Yan Duvar Analiz Sonuçları	36
5.2. Taban Analiz Sonuçları	42
5.3. Tavan Analiz Sonuçları	48
5.4. Pencere Analiz Sonuçları.....	53
5.5. Isıl Yüklerin Değerlendirilmesi.....	55
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	64
KAYNAKÇA	65
EKLER	
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1. Ülkelere ve ulaştırma sistemlerine göre yolcu taşımaları (yolcu – km)	3
Tablo 1.2. Ülkelere ve ulaştırma sistemlerine göre yük taşımaları (ton – km).....	4
Tablo 1.3. Türkiye’de ulaştırma sistemlerine göre yük taşımaları (ton – km).....	6
Tablo 1.4. Türkiye’de ulaştırma sistemlerine göre yük taşımaları (ton – km).....	6
Tablo 3.1. DMU tren setinin teknik bilgileri.....	21
Tablo 3.2. TVS-2000 kompartımanlı vagonunun teknik bilgileri.....	22
Tablo 3.3. TVS-2000 kuşetli vagonunun teknik bilgileri	22
Tablo 3.4. TVS-2000 lüks pulman vagonunun teknik bilgileri	23
Tablo 3.5. TVS-2000 yataklı vagonunun teknik bilgileri	24
Tablo 3.6. TVS-2000 yemekli vagon teknik bilgileri	24
Tablo 4.1. Analizde kullanılan yalıtım malzemelerinin özellikleri.....	32

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. TVS 2000 tipi çekilen araç klima sistemi parçaları	28
Şekil 4.1. Konvansiyonel vagonun patlatılmış teknik resmi	30
Şekil 4.2. Konvansiyonel vagonun geometrik ölçüleri ve bölümleri	31
Şekil 4.3. Konvansiyonel vagonun tavan teknik resmi	31
Şekil 4.4. Tren zarfı için konveksiyon sınır şartları	33
Şekil 4.5. Tren zarfı için radyasyon sınır şartları	34
Şekil 4.6. MASTECH MS6540B lazer ölçüm cihazı ile benzer bir ürünün güneş altında sıcaklık ölçümü	35
Şekil 4.7. Tavan geometrisine ait ağ yapısı	35
Şekil 5.1. 50 mm yalıtım kalınlığındaki yan duvarın yaz ve kış koşullarındaki analiz sonuçları	36
Şekil 5.2. 70 mm yalıtım kalınlığındaki yan duvarın yaz ve kış koşullarındaki analiz sonuçları	37
Şekil 5.3. 90 mm yalıtım kalınlığındaki yan duvarın yaz ve kış koşullarındaki analiz sonuçları	39
Şekil 5.4. Yan duvarların yaz ve kış koşullarında ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan yalıtım malzemesi için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçları	40
Şekil 5.5. Yan duvarların yaz ve kış koşullarında ısı iletim katsayısı 0,046 W/mK olan yalıtım malzemesi için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçları	41
Şekil 5.6. Yan duvarların yaz ve kış koşullarında ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan yalıtım malzemesi için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçları	41
Şekil 5.7. 50 mm yalıtım kalınlığındaki tabanın yaz ve kış koşullarındaki analiz sonuçları	42
Şekil 5.8. 70 mm yalıtım kalınlığındaki tabanın yaz ve kış koşullarındaki analiz sonuçları	44
Şekil 5.9. 90 mm yalıtım kalınlığındaki tabanın yaz ve kış koşullarındaki analiz sonuçları	45
Şekil 5.10. Tabanın yaz ve kış koşullarında ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan yalıtım malzemesi için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçları	46

Şekil 5.11. Tabanın yaz ve kış koşullarında ısı iletim katsayısı 0,046 W/mK olan yalıtım malzemesi için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçları	47
Şekil 5.12. Tabanın yaz ve kış koşullarında ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan yalıtım malzemesi için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçları	47
Şekil 5.13. 50 mm yalıtım kalınlığındaki tavanın yaz koşullarındaki analiz sonuçları	48
Şekil 5.14. 70 mm yalıtım kalınlığındaki tavanın yaz koşullarındaki analiz sonuçları	49
Şekil 5.15. 90 mm yalıtım kalınlığındaki tavanın yaz koşullarındaki analiz sonuçları	50
Şekil 5.16. Tavanın yaz koşullarında ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan yalıtım malzemesi için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçları	51
Şekil 5.17. Tavanın yaz koşullarında ısı iletim katsayısı 0,046 W/mK olan yalıtım malzemesi için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçları	52
Şekil 5.18. Tavanın yaz koşullarında ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan yalıtım malzemesi için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçları	53
Şekil 5.19. Pencerenin yaz ve kış koşullarında farklı ısı iletim katsayıları için analiz sonuçları	54
Şekil 5.20. Yan duvara ait yaz ve kış koşullarında t=50 mm kalınlıktaki ısı yükleri.....	55
Şekil 5.21. Yan duvara ait yaz ve kış koşullarında t=70 mm kalınlıktaki ısı yükleri.....	56
Şekil 5.22. Yan duvara ait yaz ve kış koşullarında t=80 mm kalınlıktaki ısı yükleri.....	57
Şekil 5.23. Yan duvara ait yaz ve kış koşullarında t=90 mm kalınlıktaki ısı yükleri.....	57
Şekil 5.24. Tavana ait yaz koşullarında farklı kalınlıktaki ısı yükleri	59
Şekil 5.25. Tabana ait yaz ve kış koşullarında t=50 mm kalınlıktaki ısı yükleri.....	60
Şekil 5.26. Tabana ait yaz ve kış koşullarında t=70 mm kalınlıktaki ısı yükleri.....	60
Şekil 5.27. Tabana ait yaz ve kış koşullarında t=80 mm kalınlıktaki ısı yükleri.....	61
Şekil 5.28. Tabana ait yaz ve kış koşullarında t=90 mm kalınlıktaki ısı yükleri.....	62
Şekil 5.29. Pencereye ait yaz ve kış koşullarında ısı yükleri.....	63

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	: Santigrat derece
GWh	: Gigawatt saat
h	: Konveksiyon ısı aktarım katsayısı
k	: Isı iletim katsayısı
km	: Kilometre
km/s	: Kilometre/saat
kW	: Kilowatt
L	: Toplam kalınlık
mm	: Milimetre
MWh/y	: Megawatt saat/yıl
t	: Kalınlık
T	: Sıcaklık
V	: Hız
W/m ² K	: Watt/metre-kare Kelvin
W/mK	: Watt/metre Kelvin
ε	: Emisivite
σ	: Stefan Boltzman sabiti
3D	: Üç boyutlu
CFD	: Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
CO ₂	: Karbondioksit
DC	: Doğru akım
DM	: Tahrikli araç
DMU	: Diesel Multiple Unit (Dizel Çoklu Birim)
HVAC	: Heating Ventilating and Air Conditioning (Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme Sistemleri)
İZBAN	: İzmir Banliyö Sistemi
M	: Tahriksiz araç
MPC	: Model Predictive Control (Model Öngörücü Kontrol)
MVAC	: Mechanical Ventilating and Air Conditioning (Mekanik Havalandırma ve İklimlendirme Sistemleri)

SMC	: Sheet Moulding Compound (Sıcak Pres Kalıplama Pestili)
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
TÜDEMSAŞ	: Türkiye Demiryolu Makinaları Sanayi A.Ş.
TÜLOMSAŞ	: Türkiye Lokomotif ve Motor Sanayi A.Ş.
TÜRASAŞ	: Türkiye Raylı Sistem Araçları Sanayi A.Ş.
TÜVASAŞ	: Türkiye Vagon Sanayi A.Ş.
UIC	: Uluslararası Demiryolları Birliği
UITP	: Uluslararası Toplu Taşıma Birliği
VAC	: Volt alternatif akım
VDC	: Volt doğru akım



1. GİRİŞ

Demiryolu taşımacılığı ilk kullanılmaya başlandığı 27 Eylül 1825 tarihinden itibaren ulaşırmadaki önemi artarak devam etmiştir. Başlangıçta insan ya da hayvan gücüne dayalı olarak kullanılmaya başlayan bu taşımacılık yöntemi, buharlı lokomotiflerin icadını takiben başlayan ilgi ile o günden bu yana sürekli artmıştır. Ray, travers, balast, istasyon binaları, köprü, tünel, lokomotif depoları ve telefon direkleri gibi yapıları içerisinde bulunduran ve mekanik bir güç ile iki ayrı lokasyon arasında sabit bir yolda, yolcu ve yük taşımacılığı yapılmasını sağlayan tesisler bütünü demiryolu olarak adlandırılrsa da zaman ile gelişen teknoloji bu kavramın içeriğini zenginleştirmiştir (http-1)

1950’li yıllarda karayolu taşımacılığı kullanım kolaylığı ve erişilebilirlik olarak demiryolu taşımacılığının önüne geçmiştir. Ancak 1964 yılında Japonya’da ortaya çıkan Yüksek Hızlı Tren teknolojisi ile birlikte Avrupa ülkeleri, Çin, Güney Kore ve Türkiye gibi ülkelerde demiryolu taşımacılığı yaygınlaşarak önemini tekrar kazanmıştır. Yolcu taşımacılığında 250-300 km/s hızlara ulaşan bu önemli teknoloji günümüzde yapılan çalışmalarla 550-600 km/s gibi çok yüksek hızlara ulaşmakta ve her geçen gün bu hızın artırılabilmesi için çalışmalar sürdürölmektedir (12. Ulaştırma ve Haberleşme Şurası Sektör Raporları, 2021).

Çin, Japonya ve Güney Kore’de kullanımına başlanan Almanya’da transrapid mühendisliği adı altında geliştirmeleri devam eden bir diğer yüksek hızlı demiryolu sistemi olan Maglev tekerlek-ray etkileşiminden kaynaklanan sürtünme kuvvetini, ray ile araç gövdesi arasında oluşturulan elektromanyetik kuvvet ile sıfıra indirmektedir. Yalnızca rüzgar kuvvetine maruz kalan yapısı ile yeni bir çağ açan teknoloji gelecekte demiryolu araçlarının 1000 km/s’in üstünde hızlara çıkmasını hedeflemektedir. Mevcut durumda yapılan yatırımlar ile 2027 yılında hizmete alınması hedeflenen ve yolcu taşıma hızı 500 km/s olan Maglev inşası Japonya’da devam etmektedir.

Tüm dünyada, ölkelerin demiryolu sektöründe yaptıkları değişiklikler ile devlet müdahalesinin sektör içerisindeki payının kademeli olarak azaltılması hedeflenmiş ve bu çabalar sonunda yük taşımacılığında demiryolunun katkısı; Romanya’da %25’e, İsveç’te %35’e, Polonya’da %23’e, Almanya’da %21’e, İtalya ve Fransa’da %12’ye ulaşmıştır (TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü, Demiryolu Sektör Raporu 2016, s. 7).

2000’li yıllar ile birlikte yolcu ve yük taşımacılığında büyüme gösteren demiryolu taşımacılığı gelişme dönemine girmiş ve toplanan veriler doğrultusunda; bu büyüme trendi ile birlikte 2025 yılına kadar yolcu taşımacılığında %3,2, yük taşımacılığında %1,4 ve şehir içi taşımacılıkta %5,2 paya sahip olması beklenmektedir (Uğur, 2019).

2011 yılında Avrupa Birliği tarafından yayınlanan “Tek Avrupa Taşımacılık Sahası İçin Yol Haritası” başlıklı rapora göre kullanımda olan hızlı tren hatlarının geliştirilmesi ve 2030 yılına kadar üç katına çıkarılması hedeflenmektedir. Benzer biçimde, 2050 yılına kadar Avrupa hızlı tren şebekesinin tamamlanarak, orta mesafe yolcu taşımacılığında demiryolunun payının arttırılması öncelikli olarak hedeflendiği belirtilmiştir

Bu avantaj ile birlikte oluşan yüksek enerji talebi ve bunlara ilave olarak; son yıllarda fosil yakıt tüketiminin çevresel etkileri, enerjinin daha verimli kullanılması gerekliliği gibi hususlar, yaygın olarak elektrik kullanımına izin veren, süratli insan ve eşya taşımacılığına müsaade eden demiryolunun daha çok ön plana çıkmasına sebep olmuştur.

1.1. Dünyada Demiryolu Ulaştırması

Demiryolu taşımacılığı günümüzde, tüm dünyada, deniz ve havayollarının yetersiz ya da kullanılmaz olduğu koşullarda, karayolu taşımacılığına önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Enerji verimliliğinin daha fazla önem kazandığı, fosil yakıt tüketiminin çevre üzerindeki etkilerinin daha fazla dikkat çektiği günümüz koşullarında, daha büyük miktarlarda yük taşıma kapasitesi olan, daha fazla yolcu taşıyabilen demiryolları önemli bir alternatif olduğu bir kez daha hatırlanmıştır.

Dünya genelinde, domestik taşımacılık özelinde, karayollarının demiryollarına göre büyük bir üstünlüğü bulunmaktadır. Taşıma modları arasındaki bu farklılık ülkeden ülkeye değişmekle birlikte, dünya genelinde %90-95 aralığındaki bir oranla öncelikli olarak karayolu tercih edilirken, demiryolu ancak %5-10 mertebesindeki bir oranla tercih edilmektedir. Avrupa’nın en düşük demiryolu taşımacılık oranına sahip ülkelerinden Yunanistan’da hem yük hem yolcu taşımacılığında karayolunun payı %97-99 iken demiryolunun payı sadece %1-3’tür. Avrupa kıtasında demiryolunun payının oranın yüksek olduğu ülkelerden Almanya’da %25 ve Finlandiya’da %27’dir. Amerika kıtasında özellikle yük taşımacılığında demiryolunun payı yarıya yakinken (%43), bu oran Asya

ülkelerinde özellikle Rusya ve Ukrayna’da demiryolu lehine değişmektedir. Bu iki ülkede yük taşımacılığında demiryolunun payı sırasıyla, %96 ve %76 olarak kaynaklarda belirtilmiştir (UIC, 2017).

Demiryolunun; birim yük başına birim enerji tüketimi hususunda sağladığı avantajların yanı sıra, birim yük başına çevresel etkilerinin karayoluna kıyasla düşük olması, enerji kaynağı olarak elektrikten yararlanması gibi hususlar dikkate alındığında da, diğer modlara göre büyük bir avantaja sahip olduğu görülmektedir. Dünya’da ulaşım sektörü; 2015 yılında küresel enerji ile ilgili CO₂ emisyonlarının %24,7'sinden, küresel nihai enerji tüketiminin %28,8'inden, küresel taşımacılık CO₂ emisyonlarının %4,2'sinden ve ulaşım enerji talebinin %1,9'undan sorumlu olmuştur. 1990 ve 2015 yılları arasında; taşıma birimi başına enerji tüketimi %35,8 azalırken, taşıma birimi başına CO₂ emisyonları %31,6 azalmıştır. Her iki durumda da azalmanın yarısından fazlası 2005'ten 2015'e kadar olan on yılda sağlanmıştır. 2005 ve 2015 yılları arasında yolcu-km başına; demiryolu enerji tüketimi %27,8 ve demiryolu CO₂ emisyonları %21,7 azalmıştır ve yine aynı yıllarda yük ton-km başına; enerji tüketimi %18,1 ve CO₂ emisyonları ise %19 azalmıştır (UIC, 2017).

Dünya’da küresel demiryolu yakıt karışımında petrol ürünlerinin (dizel) payı, 2005 ve 2015 yılları arasında %62,2'den %56'ya düşmüştür ve buna bağlı olarak yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektriğin payı aynı dönemde %65 artmıştır (UIC, 2017).

Dünya’da 2015 yılında demiryolu, küresel yolcu taşımacılığı faaliyetinin (yolcu-km olarak) %6,7'sini ve küresel yük taşımacılığı faaliyetinin (ton-km olarak) %6,9'unu oluşturmuştur. Yüksek hızlı trenin küresel şehirlerarası demiryolu içindeki payı 2010 ile 2015 arasında önemli ölçüde artarak %10'dan %20'ye iki katına çıkmıştır. Bu dönemdeki artış, büyük ölçüde Çin'deki yüksek hızlı demiryolu faaliyetindeki artıştan kaynaklanmaktadır (UIC, 2017).

Tablo 1.1. Ülkelere ve ulaştırma sistemlerine göre yolcu taşımaları (yolcu – km)

Ülke	Demiryolu	%	Otomobil	%	Otobüs	%	Toplam
İngiltere	71,8	8,5	737,6	87,4	34,1	4,0	843,5
AB	493,2	8,1	5.062,6	83,3	520,8	8,6	6.076,6
Amerika	38,3	0,4	7.876,7	92,4	613,4	7,2	8.528,5

Tablo 1.2. Ülkelere ve ulaştırma sistemlerine göre yük taşımaları (ton – km)

Ülke	Demiryolu	%	Karayolu	%	İç Su Yolu	%	Petrol Boru Hattı	%	Toplam
İngiltere	16,88	8,7	168,10	86,1	0,2	0,1	9,97	5,1	195,1
AB	423,28	16,2	1.932,32	74,1	139,9	5,4	110,98	4,3	2.606,5
Amerika	2.357,12	31,8	2.969,50	40,0	664,4	9,0	1.429,81	19,3	7.420,8

Demiryolu tarihindeki önemli gelişmeler şunlardır (<http-2>):

- 16. ve 17. yüzyıllarda buharla çalışan lokomotifler ve demiryolu hatlarından önce vagon yolları oluşturulmuştur. Vagon yolları, zemindeki ahşap üzerine paralel kalaslar döşenerek, atların kalasların üzerinde vagonları çekmesiyle kullanılmıştır.
- 18. yüzyıl, demir plakaların ve buhar motorlarının başlangıcını oluşturmuştur. Ahşap raylara dökme demir levhalar sabitlenerek rayın dayanıklılığı artırılmıştır. Zamanla L şeklinde metal plakalar kullanılmıştır. 1803'te William Jessop, çift hatlı bir plaka olan Surrey Demiryolu'nu geliştirmiş ve ardından tamamen demir kenarlı ray ve flanşlı tekerlekler üretmeye devam etmiştir.
- 1798'de; plakalı sistem, İngiltere'nin, hem kömür hem de yolcu taşıyan dünyanın ilk kamu demiryolu olan Lake Lock Demiryolu için kullanılmıştır. Lake Lock Demiryolu üzerindeki vagonlar atlar tarafından çekilmiştir. 1784'te William Murdoch, kendinden tahrikli bir buharlı arabanın çalışan bir modelini ürettiğinde demiryollarında hayvan gücü kullanımı tarihe karışmıştır.
- Buharla çalışan bir lokomotif konsepti Richard Trevethick tarafından benimsenmiştir. 1804'te Trevethick, İngiltere'de Merthyr Tydfil yakınlarındaki tramvay boyunca bir tren çeken ilk buharlı demiryolu lokomotifini tasarlamıştır.
- 1812'de Matthew Murray'in Leeds'deki Middleton Demiryolu için inşa edilen Salamanca adlı yeterince hafif olan ilk ticari buharlı lokomotifi tasarlamıştır.
- Bu noktada demiryolu sektöründeki gelişmeler büyük bir ivme kazanmıştır. 1812'de Christopher Blackett ve William Hedley tarafından inşa edilen Puffing Billy, ilk adezyon lokomotifi olmuştur. 1814'te George Stephenson, başka bir başarılı adezyon lokomotifi olan Blücher'i tasarlamıştır.
- Stephenson daha sonra 1825'te The Locomotion adlı ilk kamu buharlı demiryolunu geliştirmeye devam etmiştir. Stephenson'ın başarıları 1830'da

Liverpool ve Manchester Demiryolu'nun açılmasıyla doruğa ulaşmıştır. Sadece buharlı lokomotif kullanan ilk şehirlerarası demiryolu olması, modern demiryolunun doğuşunu temsil etmiştir. Popülerliği demiryolu endüstrisinin genişlemesine yol açmıştır.

- 1837'de Robert Davidson, pillerle çalışan ilk elektrikli lokomotifi yapmıştır. Elektrifikasyonla ilgili deneyler 19. yüzyılın sonlarında devam etmiştir. 20. yüzyılda çoğu demiryolları elektrik enerjisi ile donatılmıştır.
- 20. yüzyılda dizel motorlar ve ilk yüksek hızlı trenler kullanılmaya başlanmıştır. Dizel, 1892'de Rudolf Diesel tarafından patentlendikten sonra, mühendisler lokomotifler için dizel motorlar geliştirmeye başlamışlardır. Dizel kullanımı; daha iyi ivmelenme, daha iyi yakıt verimliliği ve daha az servis ihtiyacı sağlamıştır. 1960'larda dizel, buharın yerini neredeyse tamamen almıştır.

Yüksek hızlı demiryolu tarihindeki önemli gelişmeler şunlardır: (TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü, 2021 yılı Demiryolu Sektör Raporu, 2022, s. 52)

- 1964 yılında Japonya'da Tokyo ve Osaka şehirlerini birbirine bağlayan ilk yüksek hızlı demiryolu işletmeye alınmıştır.
- 1977 yılında İtalya'da Roma-Floransa (Direttissima) arasındaki hızlı tren hattının ilk kısmı işletmeye alınmış olup, ilk kısım 122 km uzunluğa ve maksimum 250 km/s hıza sahipti.
- 1981 yılında Fransa'da Paris ve Lyon şehirlerini birbirine bağlayan Avrupa'nın ilk yüksek hızlı demiryolu işletmeye alınmış olup, hat uzunluğu 419 km ve maksimum hızı 300 km/s'dir.
- 2008 yılında Çin'de Pekin-Tianjin yüksek hızlı demiryolu, 350 km/s hıza ulaşarak dünyanın en hızlı treni olarak işletmeye alınmıştır.
- 2011 yılında Çin'de Pekin-Şanghay arasında tek fazla inşa edilen 1318 km'lik yüksek hızlı demiryolu ticari hizmet için işletmeye alınmış olup, dünyanın en uzun yüksek hızlı hattıdır.
- 2019 yılında Fas'ta "Al Boraq" servisleri ile Fas'ın Tanger ve Kenitra şehirlerini birbirine bağlayan Afrika'daki ilk yüksek hızlı demiryolu açıldı.
- 2020 yılında Çin'de Pekin ve Zhangjiakou arasında ilk otonom yüksek hızlı treni işletmeye alınmıştır.

1.2. Türkiye’de Demiryolu Ulaştırması

Ülkemizde ise demiryoluna olan ilgi ne yazık ki uzunca bir süre olması gerekenin uzağında kalmıştır. Osmanlı Dönemi’nde inşa edilen demiryolu hatlarının uzunluğu sadece 4.136 km’de kalmıştır. 1923-1950 tarihleri arasında ise, yılda ortalama sadece 134 km demiryolu inşa edilmiştir ve toplamda 3.764 km’lik yeni demiryolu işletmeye alınmıştır. 2000’li yıllara kadar demiryolu taşımacılığını geri planda tutan ulaştırma politikaları izlenmiştir. Bu dönemde inşası tamamlanıp, işletmeye alınan toplam hat uzunluğu 945 km’dir. Takip eden yıllarda ise, bu yönde daha karalı politikaların belirlenmesi ve adımların atılması ile toplam demiryolu hattı uzunluğu 10.959 km’den 13.022 km’ye çıkarılmıştır. Bu süreçte eklenen hatlarla birlikte; 2021 sonu itibari ile ülkemizde 1213 km’lik yüksek hızlı tren, 219 km hızlı tren ve 11.590 km konvansiyonel demiryolu hattı mevcuttur. (TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü, 2021 yılı Faaliyet Raporu, s. 46)

Tablo 1.3. Türkiye’de ulaştırma sistemlerine göre yük taşımaları (ton – km)

Ülke	Demiryolu	%	Karayolu	%	İç Su Yolu	%	Petrol Boru Hattı	%	Toplam
Türkiye	14,71	4,4	267,58	79,5	-	-	54,24	16,1	336,5

Tablo 1.4. Türkiye’de ulaştırma sistemlerine göre yük taşımaları (ton – km)

Ülke	Demiryolu	%	Otomobil	%	Otobüs	%	Toplam
Türkiye	14,3	4,2	240,5	70,3	87,1	25,5	341,9

Cumhuriyetin kuruluşundan günümüze kadar demiryolu ulaştırmasının tarihsel süreci aşağıdaki şekilde özetlenmiştir: (TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü, 2021 yılı Faaliyet Raporu, 2022, s. 32-33)

- 24 Mayıs 1924 tarih ve 506 sayılı Kanun ile Nafia Vekaletine (Bayındırlık Bakanlığı) bağlı “Anadolu Bağdat Demiryolları Müdüriyeti Umumiyesi” kurulmuştur.
- Demiryolu alanında ilk bağımsız yönetim birimi olarak 31 Mayıs 1927 tarih ve 1042 sayılı Kanun ile “Devlet Demiryolları ve Limanları İdare-i Umumiyesi” kurulmuştur ve 27 Mayıs 1939 tarihinde kurulan Münakalât Vekâleti (Ulaştırma

Bakanlığı)’ne bağlanmıştır. Cumhuriyet öncesinde yapılan ve yabancı şirketler tarafından işletilen hatlar, 1928-1948 yılları arasında satın alınarak millileştirilmiştir.

- 22 Temmuz 1953 tarihine kadar katma bütçeli bir devlet idaresi şeklinde yönetilen demiryolları, 6186 sayılı Kanunla Ulaştırma Bakanlığına bağlı olarak “Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları İşletmesi” (TCDD) adı altında Kamu İktisadi Devlet Teşekkülü haline getirilmiştir.
- TCDD, 8 Haziran 1984 tarih ve 233 sayılı Kanun Hükmünde Kararname ile Kamu İktisadi Kuruluşu olmuştur. TÛLOMSAŞ, TÛDEMSAŞ ile TÛVASAŞ’nin oluşturduğu ortaklık ile Ulaştırma Bakanlığına bağlanmıştır.
- 1 Mayıs 2013 tarihinde Resmi Gazetede yayımlanan 6461 sayılı “Türkiye Demir Yolu Ulaştırmasının Serbestleştirilmesi Hakkındaki Kanun” ile tekrar İktisadi Devlet Teşekkülüne dönüşmüştür.
- TCDD, 1 Ocak 2017 tarihi itibarıyla, Demiryolu Altyapı İşletmecisi; TCDD Taşımacılık AŞ, Demiryolu Tren İşletmecisi olarak hizmete alınmıştır.
- TÛLOMSAŞ, TÛDEMSAŞ ve TÛVASAŞ 4 Mart 2020 tarihli Resmi Gazetede yayımlanan 2186 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararı ile TCDD bağlı ortaklığı olmaktan çıkarılmış olup, birleştirilerek İktisadi Devlet Teşekkülü olan Türkiye Raylı Sistem Araçları Sanayi Anonim Şirketi (TÛRASAS) kurulmuştur.

1.3. Demiryolu Taşımacılığının Avantajları ve Dezavantajları

Demiryollarının diğer ulaşım türlerine göre belli başlı avantajları bulunmaktadır. Bu avantajlar şunlardır:

- Ekonomiktir. Büyük toplum kesimlerinin daha kolay ve ucuza taşınması sağlanır.
- Vagon sayısı arttıkça taşınan yük miktarı ve yolcu kapasitesi de artar. Taşıma kapasitesinin fazla olması karayolu veya havayolu taşımacılığına göre maliyeti büyük ölçüde azaltmaktadır.
- Yük taşımacılığında büyük hacimli ve uzak mesafe taşımalarında uygundur.
- Hızlı, düzenli, güvenli ve konforludur.

- Kötü hava koşulları diğer taşımacılık yöntemlerinin hepsini etkilerden demiryolunu etkilenmez.
- Sefer süreleri sabittir. Bu durum yüklerinizin ne zaman teslim edileceğini kesin olarak bilmenizi sağlar.
- Daha az enerji tüketerek çevreyi daha az kirletir.

Demiryollarının diğer ulaşım türlerine göre belli başlı dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajlar şunlardır:

- Düşük kapasite ile çalıştığında yatırım ve işletme maliyetleri çoktur.
- İlk yatırım maliyetleri yüksektir.
- Rijit bir sistemdir. Değişiklik yapılması zor ve pahalıdır.
- Demiryolu taşımacılığı esnasında yükler belli bir istasyondan alınarak belirlenen istikamette ilerler ve belirtilen istasyona teslim edilir. Belirli noktalara teslim yapılması dezavantajıdır.
- Demiryolu taşımacılığında belirli hız sınırlarına uyulması gerektiği için sevkiyat süreleri uzun olmaktadır. Bu durum önceden planlanmayan sevkiyatlar için hızlı ulaşım engel olmaktadır.

2. RAYLI SİSTEM ARAÇLARI İLE İLGİLİ YAPILAN ENERJİ VERİMLİLİĞİ ÇALIŞMALARI

2.1. Literatür Taraması

Raylı sistemlerde enerji verimliliğinin tespit edilmesi, eksikliklerin analizi, mevcut durumun incelemesi üzerine literatürde sayısız çalışmalar yürütülmüş ve araştırmacılar konu üzerinden sayısız yayın, rapor yayınlamışlardır.

Dullinger vd. (2015), çalışmalarında, demiryolu araçlarında enerji tüketimini hesaplayabilmek için termal simülasyon modülü geliştirmişlerdir. Hafif raylı araçlar için geliştirilen modül ile HVAC sistemlerinin enerji tüketimlerinin hesaplanması konusunda yardımcı olabilecek modül önermişlerdir. Önerdikleri modül, HVAC sistemleri için esas olan parametrelere girişi sağlayabilecek bir yapıdır. Çalışmada kullanılan simülasyon dinamik termal araç sistemiyle operasyonel ve hava girdilerini kombine ederek analiz edebilen bir modüldür. Araştırmadaki araç modeli, rüzgar tünelli iklimatik odadan elde ettiği verileri kullanan veri tabanlı sistem tanımla modülü olarak tanımlanmıştır. Gri Kutu modelleme yaklaşımına göre elde edilen parametreler fiziksel olarak yorumlanabilmektedir. Çalışmalarında gözlem zamanının kısa olması sebebiyle araştırmacılar, zamana bağlı değişimleri gözleme olanağı bulmuşlardır. Önerilen modül, kullanıcı dostu bir arayüze entegre edilmiş ve bu arayüz yardımıyla veri setlerini işlemek, sonuçları zaman domainleri içinde gösterebilmek ve yıllık enerji tüketimlerini hesaplamak gibi işlemler kolaylaştığı belirtilmiştir.

Barone vd. (2020), TRNSYS programı ile bütün çevresel şartları bir demiryolu aracı üzerine uygulayarak gerçek zamanlı dinamik bir analiz yapmayı, enerji kaybını azaltabilecek çözümler bulmayı amaçlamıştır. Simülasyon çalışmasında sabit bir binadan farklı olarak, tren hareketi ve konumu ile değişen parametreleri kullanmıştır. Simülasyonun doğruluğu için programa; coğrafi konum, oryantasyon, hız, rüzgar, güneş ışınlarının yönü, nem ve bağıl hız gibi parametreler değişken olarak dosya halinde girilmiştir. Analiz için tren ve HVAC sistemi gerçekte kullanılan malzemelere göre 3D modellenmiştir. Analizin çalışma algoritması oluşturulmuştur. Çalışmanın temel amacı, toplam tren enerjisinin %30'unun harcadığı HVAC sisteminin; yolcu konforuna zarar vermeden, verimini artırmak, enerji kullanımını ve karbon salınımını azaltmaktır. Daha önceki yapılan çalışmalardan farklı olarak trenin yapısalında kullanılan yalıtım malzemesi ve HVAC tasarımıındaki iyileştirmeler yapılabileceğini açıklamıştır. Çalışma

sonucunda yapılabilecek değişiklikler ile yolcuların konfor şartları değiştirilmeden enerji tüketiminin 0,4 MWh/y ile 6 MWh/y azaltılabileceği belirtilmiştir. Ek olarak CO₂ salınımının düşürülebileceği yollar anlatılmıştir.

Vetterli vd. (2015), çalışmasında Basel Üniversitesi ve diğer kurumlar ile birlikte İsviçre Rhaetian Demiryolunda bulunan bir EWII yolcu trenini üç yıl boyunca incelemiştir. Trenden alınan veriler ile analiz programı kalibre edilmiştir. Tren enerji tüketiminin %20-40 arasında olan bölümünün konfor fonksiyonları olarak kullanıldığı anlaşılmıştir. Yapılan çalışmalar sonucu konfor fonksiyonları için kullanılan enerjide tren yapısalı ve HVAC sisteminden kaynaklı kayıplar yaşıandığı anlaşılmıştir. Kabin içi ısı kaybının %55'inin tren yapısalından, %37'sinin HVAC sisteminden oluştuğu anlaşılmıştir. Bütün çevresel ve iç şartlar dinamik olarak analiz edilerek bu kayıplara karşı çözümler aranmiştir. Pencerelerin ısı iletim katsayısının 3,1 W/m²K'den 1,2 W/m²K'e düşürölmesi ile ısıtma talebinin %4 azaldığı görölümüştir. Vagonlar arası geçişi sağlayan vestiböl hava sıcaklığının 6 °C ile sınırlandırılması ısıtma talebinin %10 azaldığını göstermiştir. Vagon iç hava sıcaklığının 22,5 °C'den 20,5 °C'ye düşürölmesi ısıtma talebini %13 azaltmıştir. Havalandırma sisteminde ısı geri kazanımı uygulanarak ısıtma talebi %26 azaltılmıştir. Kabin içi CO₂ kaynaklı oluşun havalandırma ihtiyacında gerekli CO₂ miktarının arttırılması ısı kaybını engelleyerek, ısıtma talebini %29 oranında azaltmıştir. Bulunan çözümlerin maliyet-fayda olarak uygunluğu değerlendirilmiştir.

Amri vd. (2011), yaptıkları çalışmada, 2008'den 2020'ye kadar yolcu taşımacılığı ihtiyacının %50 artış gösterdiğini belirtmiştir. Bu artış oranı enerji verimliliği çalışmalarının artırılmasına sebep olmuştur. HVAC ünitesi enerji tüketimi, bir metro aracının toplam enerji tüketiminin yaklaşık üçte biri olduğu belirtilmiştir. Enerji tüketimini azaltmanın temel fikri, HVAC ünitesinin talep ettiği enerji miktarını, tren içi sıcaklık ve CO₂ miktarına göre belirlenen parametrelerde akıllı bir yazılım ile kontrol altına almaktır. Bu çalışmada, bir metro aracı için özel olarak tasarlanmış talebe dayalı bir kontrol stratejisinden bahsedilmiştir. Isıtma ve havalandırma için kullanılan mevcut kontrol sistemi, talep kontrollü (akıllı) bir ısıtma ve havalandırma ünitesi ile karşılaştırılmıştir. Bir simölasyon platformu sağlamak için aracın termal modeli oluşturulmuştur. Simölasyona demiryolunun hava ve çalışma koşulları da dahil edilmiştir. Kullanılan talep kontrollü ısıtma ve havalandırma ünitesi ile enerji tüketiminde 325 MWh/y azalma simölasyon ile doğrulanmıştir.

Marcos vd. (2014), yaptıkları çalışmada yolcu taşımacılığında kullanılan klimanın araç toplam enerjisinin önemli bir yüzdesini oluşturduğunu ve dikkatli bir şekilde analiz edilmesi gereken önemli bir sistem olduğunu belirtmiştir. Çalışmada bir araç için basit ve dinamik bir model hazırlanmıştır. Model teorik ısı transferi, termal atalet ve radyasyon denklemlerine dayandırılmaktadır. Çalışmada yapılan üç farklı deney, simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak yapılan deneylerde ölçülen sonuçlar ile simülasyon modeli benzer sonuçları vermektedir. Araç içi HVAC sisteminin simülasyona entegre edilmesi ve enerji verimliliği çalışmaları yapılabilmesi için model doğrulanmıştır.

Liu vd. (2011), çalışmalarında klimalı bir tren bölmesinde dinamik soğutma yükünü simüle etmek için matematiksel bir model oluşturmuştur. Çin'in üç ana demiryolu hattında temmuz ayının ortalama en sıcak ortam koşullarında YZ25G tipi trenin bölmesi için dinamik soğutma yükleri araştırılmıştır. Çin'de demiryolu taşımacılığına artan talep ile birlikte kabin içi konfor için klimalar tarafından kullanılan toplam tren enerjisinin %70'inden kaynaklanan enerji talebinin azaltılması gerektiği belirtilmiştir. Modelin oluşturulması için tren bölmesi, tren zarfı, pencere, soğutma yükü iletimi, radyasyon, havalandırma, doluluk oranı ve elektrikle çalışan diğer ekipmanlar gibi sınır şartları hesaplanmıştır. Modelleme için Gambit, dinamik simülasyon için FLUENT kullanılmıştır. Sonuçlar tren bölmesinin toplam soğutma yükü talebinin farklı bölgelerde farklı saat dilimlerinde maksimum 40,4 kW ile 43,8 kW ve minimum 4,5 kW olduğunu göstermiştir. Çin ulusal standardı ile sonuçlar karşılaştırılmıştır ve daha az enerji tüketimi için çalışmanın dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir.

Gunselmann (2005), çalışmasında artan demiryolu taşımacılığı talebi doğrultusunda oluşan yüksek enerji talebinin azaltılmasına yönelik araştırmalar yapmıştır. Demiryolu araçlarının gelişen teknolojisine rağmen enerji verimliliği çalışmalarının yapılabileceği başlıklar anlatılmıştır. Ortalama tren enerjisinin %12 azaltılmasının frenleme kayıplarının indirgenmesiyle mümkün olduğunu gösterilmiştir. Hız profili optimizasyonu ile enerji tüketiminde %25 azalma olduğu belirtilmiştir. Bunlara ek olarak rota çakışmalarının engellenmesi ve optimize edilmiş zaman çizelgelerinin enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik etkileri anlatılmıştır. Özellikle şehir içi DC demiryolu sistemlerinde frenleme enerjisinin depolanması veya ivmelenen tren için kullanılması ile yılda 340.000 kWh'te kadar enerji tasarrufunun gerçekleşeceği belirtilmiştir. 300 araçlık USTRA filosunda hiçbir ek maliyet oluşturulmadan sadece

sıcaklık kontrollü ısıtma tekniği ile yılda yaklaşık 1,3 GWh enerji tasarrufu sağlanmıştır. Bununla birlikte CO₂ yoğunluğuna uyarlı kontrollü bir klima, araç gövdesindeki açıklıkların ve toplam ağırlığın azaltılması gibi yöntemler ile enerji verimliliğinde oluşacak artışlar belirtilmiştir.

Ampofo vd. (2004), demiryolu hatları üzerindeki tünellerde tren geçişleri sebebiyle oluşan sıcak havanın diğer kabin içi sıcaklık etkileriyle birleşerek yolcuların konfor şartlarını düşürdüğünü belirterek tünellerin soğutulmasına yönelik bir çalışma yapmıştır. Tünel içi ısınmanın %80 oranla fren mekanizmasından kaynaklandığını belirtmiştir. Yaz aylarında Londra metrosunda 37 °C ölçülen tünel içi sıcaklığı kabinlerde yolcu konforu için çok daha fazla soğutma yükü ihtiyacı oluşturmaktadır. Tünelin ve aracın matematiksel modeli oluşturulmuştur. Tünel içi farklı soğutma yöntemleri ile soğutma yükü için talep edilen enerji miktarının azaltıldığı görülmüştür.

Chow ve Yu (2000), yaptıkları çalışmada Hong Kong'daki demiryolu hatlarında bulunan tren kompartımanlarındaki iç mekan hava kalitesinin ölçüsü olarak karbondioksit miktarını ele almışlardır. Karbondioksit seviyesini belirli bir seviyede tutabilmek için MVAC (Mekanik Havalandırma ve İklimlendirme Sistemi) kullanılmıştır. MVAC sisteminin tüketeceği enerjiyi incelemek için enerji simülasyon yazılımı TRACE 600 kullanılmıştır. Makale tarafından önerilen iç mekan karbondioksit seviyesini koruyabilmek için MVAC tarafından kullanılması öngörülen enerji standart bir havalandırmanın enerjisinin 4,4 katıdır. Önerilen sistem hava kalitesini arttırmakla birlikte enerji tüketimini de arttırmaktadır.

Powell vd. (2014), yaptıkları deneysel çalışmada şehir içi raylı sistemlerde hareketsiz vagonun enerji kullanımını araştırmak için 90 araçtan oluşan İngiltere'nin kuzey doğusundaki (Birleşik Krallık) Newcastle upon Tyne bölgesindeki Tyne and Wear metrosundaki bir aracı seçmişlerdir. Aracın bir yıl boyunca tükettiği güç ve kat ettiği mesafeyi ölçmüşlerdir. Aracın yıllık enerji tüketiminin yaklaşık %11'inin yardımcı sistemler tarafından kullanıldığı tespit edilmiştir. Yardımcı sistemler tarafından tüketilen enerjinin; %45'i ısıtma, %10'u aydınlatma, %4'ü basınçlı hava, %41'i fanlar ve kontrol sistemleri dahil diğer ekipmanlar tarafından kullanılmaktadır. Ortam sıcaklığı, güneş radyasyonu ve rüzgar hızı enerji tüketimini etkileyen başlıca konulardır. Sonuç olarak çalışma hareketsiz araçta tüketilen enerjinin hareketli bir araçta tüketilen enerjiye göre

yok sayılamayacak kadar fazla olduğunu göstermiştir. Çalışmada enerji tüketimini azaltabilecek önlemlerden bahsedilmemiştir.

Hofstadter vd. (2018), yaptıkları çalışmada Avusturya'nın Viyana şehrinde çalışan bir tramvay için konfor ve enerji talebini analiz etmişlerdir. Çalışmada zarf ve HVAC sistem bileşenlerini içeren uygun bir matematiksel model geliştirilmiştir. Model hesaplamayı kolaylaştırmak için problemi adımlara ayırmaktadır. MPC sistemi, tramvay modelini kontrol ederek bir yardımcı kontrol değişkeni hesaplamaktadır. Tam sayılı doğrusal optimizasyona dayalı bir yöntem, HVAC için anahtarlama komutlarını hesaplamaktadır. İkinci yaklaşım, model öngörücü kontrol tabanlı bir yöntem kullanarak yalnızca istenmeyen koşulları önler. Benimsenen HVAC sistem, kontrol stratejisine bağlı olarak %9 ile %32 arasında değişen elektrik enerjisi tasarrufu sağlamaktadır.

Aliahmadi vd. (2017), yaptıkları çalışmada HVAC sistemi tarafından tren vagonuna sağlanan hava akışları, FLUENT aracılığıyla bir CFD simülasyon yaklaşımıyla analiz edilmiştir. Çalışma, giriş hava hızı ve yönünün bir fonksiyonu olarak yolcuların termal konforunu araştırmaktadır. Sayısal sonuçların doğrulanması için bir deney yapılmıştır. Bölme iki durumda simüle edilir: oturan ve uyuyan insanlar ile. İnsanlı ve insansız bölme olmak üzere iki durumda sıcaklık ve hız büyüklük dağılımları elde edilmiştir. Sonuçlar, giriş hava kanalının bölme içindeki konumu nedeniyle, HVAC sisteminden girilen hava akışının çoğunlukla bölmenin sol tarafına doğru meyilli olduğunu ve bunun da bölmenin bazı bölümlerinde hava akışının termal konfor koşullarından sapmasına neden olduğunu göstermiştir. Oturan/uyuyan yolcular rahatsız olmaktadır. Ayrıca bölme tasarımında bazı basit değişikliklerin yapılmasının HVAC sistem performansını iyileştirebileceğini ve bölmedeki hava akışı dağılımını simetrik hale getirebileceğini göstermiştir. Enerji verimliliği için bir çalışma yapılmamıştır.

Shravanth Vasisht vd. (2017), yaptıkları deneysel çalışmada Hindistan Demiryolları'nın bir demiryolu vagonunun çatısına monte edilen güneş fotovoltaik modüllerinin performansını burada bildirilmiştir. Bu deneyin odak noktası, yeni nesil demiryolu araçlarında elektrik üretimi için kullanılan dizel yakıt tüketimindeki değişimin ölçülmesidir. İki esnek güneş fotovoltaik modülü entegre edilmiş bir demiryolu aracı, Güney Hindistan'ın üç popüler trenine bağlanarak 120 km/s hıza kadar çalıştırıldı. Deneysel sonuçlara dayanarak, bir güneş enerjili demiryolu vagonunun günde en az 18 kWh elektrik üretebileceği ve bunun da yıllık 1700 litre dizel tasarrufu sağlayabileceği

tahmin edilmektedir. Hindistan Demiryolları 63.511 vagon işletilmekte ve bu nedenle ideal koşullar altında yılda yaklaşık 108,5 milyon litre dizel tasarrufu sağlanabilmektedir. Bu, karbondioksit emisyonunu yılda 2,9 milyon ton azalttığı için çevre kirliliğini kontrol etmeye ve iklim değişikliğini hafifletmeye yardımcı olacaktır. Hindistan Demiryolları'nın çeşitli rotalarda güneş enerjili vagonları çalıştırmanın faydalarını hesaplamasını sağlamak için vagonun birim çatı alanı başına güç çıkışını tahmin etmek için istatistiksel bir model geliştirilmiştir.

2.2. Motivasyon

Demiryolu araçları 1825 yılından itibaren teknolojinin gelişmesi ile birlikte ulaşım sektöründe önemli bir konuma gelmiştir. Son 10 yılda demiryolu taşımacılığına ilgi artarak devam etmektedir. İlginin artmasının sebeplerinden biriside tüm dünyada ulaşım sektöründe CO₂ salınımının en aza indirgenmek istenmesidir.

Son yıllarda yaşanan olaylar ile birlikte ciddi bir enerji krizi ortaya çıkmıştır. Bu bize enerjiyi verimli ve dikkatli kullanmamız gerektiğini açık bir şekilde göstermektedir.

Yapılan literatür incelemesinde yolcu taşımacılığında kullanılan demiryolu araçlarının toplam tükettiği enerjinin yaklaşık %30'unun yolcuların konfor şartlarını sağlamak için kullanıldığı göstermiştir. Yıllık tüketim olarak değerlendirildiğinde bu miktar ciddi bir enerji tüketiminin olduğunu ve enerji verimlilik çalışmalarının bu alanda yapılması gerektiğini bize anlatmaktadır.

Daha önceki çalışmalarda İklimlendirme aydınlatma gibi sistemlerde yapılan çok sayıda değişikliğin yıllık enerji tüketimine etkisi net bir şekilde ifade edilmiştir. Ancak yapılan çalışmalarda tren zarf yapısı ve yapının enerji tüketimine olan etkisinin detaylı bir şekilde incelenmediği görülmüştür.

3. DEMİRYOLU ARAÇLARININ SINIFLANDIRILMASI, ARAÇ TİPLERİ VE EKİPMAN ÇEŞİTLERİ

Demiryolu taşımacılığında, gerek yük, gerekse yolcu taşımacılığında, hedeflenen taşıma eylemi, farklı taşıyıcı araçlar ile gerçekleşmektedir. İhtiyaçlara bağlı olarak dizayn edilen ve akabinde üretilen bu araçlar genel olarak yük ve yolcu vagonları olarak adlandırılmaktadır. Motorlu ya da motorsuz olarak üretilen bu araçlardan motorsuz olanları herhangi bir çeken araca ihtiyaç duymadan bu eylemi gerçekleştirebilirken, motorsuz olanları ise çekici bir araca ihtiyaç duymaktadır. Bu bölümde; demiryollarında kullanılan çeken ve çekilen araçlar sınıflandırılmış, Türkiye’de üretilen demiryolu araç tiplerine değinilmiş ve iklimlendirme başta olmak üzere kullanılan ekipmanlar kısaca tanıtılmıştır.

3.1. Demiryollarında Yolcu ve Yük Taşımacılığında Kullanılan Çeken ve Çekilen Araç Tipleri

3.1.1. Yüksek hızlı tren

Yüksek hızlı demiryolu, konvansiyonel demiryollarından önemli ölçüde hızlı seyreden, özel olarak tasarlanmış imal edilmiş araçların ve özel olarak tasarlanmış ve inşa edilmiş yollar üzerinde seyahat etmesi olarak tarif edilebilmektedir. Standart bir tarifi olmamakla birlikte, 250 km/s ve üstü hızlarda seyahat edebilen demiryolu araçlarına karşılık geldiği genel kabul görmektedir. Dünya genelinde kullanılan yüksek hızlı tren için çok sayıda tanım ve uygulanan farklı standartlar mevcuttur. Bu farklılığa rağmen yüksek hızlı trenlere özgü belirli parametreler tüm standart ve tanımlar için sabittir.

UIC (Uluslararası Demiryolları Birliği) ve Avrupa Birliği Direktifi 96/58, yüksek hızlı demiryolunu, yeni hatlarda 250 km/s veya mevcut hatlarda 200 km/s'in üzerinde çalışan demiryolu araçlarını ve altyapı sistemlerini tanımlamaktadır. Ancak yerel kısıtlamalar nedeniyle hat kullanımında daha düşük hızlarda kullanım gerekebilir.

Yüksek hızlı demiryolunun önemli bir diğer yönü, trenlerin 200 km/s üzerindeki hızlarda hareketine izin vermeye yetecek kadar ray titreşimlerini ve ray bölümleri arasındaki tutarsızlıkları azaltan sürekli kaynaklı rayın kullanılmasıdır. Tasarım hızına, eğime ve yolcular için kabul edilebilir görülen kuvvetlere bağlı olarak kurp yarıçapı 4,5 km’nin üzerindedir. Ayrıca çoğu yüksek hızlı raylı sistem için ortak olan ancak gerekli

olmayan bir takım özellikler de vardır. Bu özellikleri, neredeyse tamamı havai hatlar aracılığıyla elektrikle çalıştırılmaktadır ve hemzemin geçitlerin yanı sıra kabin içi sinyalizasyona sahiptirler.

3.1.2. Maglev treni

Maglev (manyetik levitasyon); kaldırma ve itme için çok sayıda mıknatısın manyetik levitasyonunu kullanarak, trenleri askıya alan, yönlendiren ve iten bir ulaşım sistemidir. Bu yöntem, tekerlekli toplu taşıma sistemlerinden daha hızlı, daha sessiz ve daha sorunsuzdur. Treni havaya kaldırmak için gereken güç, toplam tren enerji tüketiminden çok düşüktür. Kullanılan gücün çoğu, diğer yüksek hızlı trenlerde olduğu gibi, hava sürtünmesini yenmek için kullanılmaktadır.

Bir Maglev treninin kaydedilen en yüksek hızı, 2003 yılında Japonya'da elde edilen saatte 581 km'dir. Bu değer geleneksel TGV hız rekorundan saatte 6 km daha hızlıdır.

3.1.3. Konvansiyonel raylı sistem

Konvansiyonel taşımacılık, yüklü vagonların yerel ve uluslararası trafikte taşınmasıdır. Konvansiyonel raylı sistem, 200 km/s'e kadar hızlar için tasarlanmış sistemlerdir. Bu sistemler genellikle yolcu taşımacılığı için tasarlanmış hatlar, yük için tasarlanmış hatlar ve kombine kargo taşımacılığı için hatlardan (yolcu ve eşya taşımacılığı) oluşmaktadır. Buradan da anlaşılacağı üzere geleneksel raylı sistemler ile hem insan hem de yük taşımacılığı yapmak mümkündür.

3.1.3.1. Yük vagonları

Vagon yük taşımacılığı; demir çelik ve inşaat sektöründe kimyasallar, hammadde ve yarı mamuller, bitmiş ürünlerin paletler üzerinde nakliyesi gibi büyük miktarlarda mal pazarına yönelik taşıma hizmetleri olarak tanımlanmaktadır. Konvansiyonel yük taşımacılığı aynı zamanda belirli koşulların yerine getirilmesi durumunda özel gönderilerin taşınabilmesini sağlamaktadır. Bu taşımaları gerçekleştirmek için farklı

tiplerde vagonlar kullanılmaktadır. Yük vagonlarının tipleri ve kullanım özellikleri aşağıda belirtilmiştir (TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü, Yük Vagon Rehberi, 2019):

- G Kapalı Vagon; her türlü ev eşyası, gıda maddesi, torbalı imento, gübre, canlı hayvan vb. taşımalar yapılır.
- H Kayar Yan Duvarlı Kapalı Vagon; paketli eşya vb. taşımalar yapılır.
- E Yüksek Kenarlı Vagon; normal tip yüksek kenarlı açık vagon ile konteyner, kömür, her türlü maden cevheri, tuğla, kiremit, demir, boru, kum vb. taşıma yapılır.
- K-R Platform Vagon; normal tip platform vagon ile taşıt, iç ve tarım makineleri, beton, demir ve ağaç direk, vb. taşımalar yapılır.
- Rlins ok Amaçlı Vagon; zeri körüklü tenteyle kapatılabilen, platform tipi vagon ile taşıt, paletli araçların taşıması yapılır.
- S Platform Vagon; zel tip platform vagon ile konteyner, tank, ağır iç makineleri, tır vb. taşımalar yapılır.
- F Yüksek Kenarlı Vagon; zel tip yüksek kenarlı vagon ile kömür ve her türlü maden cevheri taşıması yapılır. Vagon stten doldurulur, yandan manuel boşaltma tertibatı ile boşaltılır.
- Ug zel Tip Vagon; dökme hububat taşıması yapılır. Vagon stten doldurulur, alttan manuel boşaltılır.
- Z Sarnılı Vagon; sıvı taşımaya mahsus sarnıçlı vagon ile her türlü akaryakıt ve sıvı taşıması yapılır.
- Uaa Ağır Yük Vagonu; trafo, jeneratör, reaktör gibi ağır ve havaleli yüklerin taşıması yapılır. Yük ağırlık aralığı; 120, 180 ve 250 tondur.
- Dökme Yük Vagonu; dökme cevher vb. yk taşımaları yapılır. Vagon stten doldurulur. Yandan boşaltılır.

3.1.3.2. Yolcu vagonları

Yolcu vagonları, talebe bağlı olarak tasarlanan, imal edilen kompartıman tiplerinden oluşmaktadır. Kompartıman eşitleri; pulman, örtülü kuşetli ve yataklı vagonlardan oluşmaktadır. Uzun yolculuk trenlerinde pulman, örtülü kuşetli ve yataklı

vagon bulunurken, kısa yolculuk trenlerde sadece pulman vagonlar bulunmaktadır. Yemekli vagon sadece yemek hizmetinin talep edildiği trenlerde bulunmaktadır.

Kompartıman vagonu yolcu vagonlarının çeşididir. İçerisinde; yolcuların konforu, seyir emniyeti, iç dekorasyon ve renk seçimleri özel olarak tasarlanmıştır. Yolcuların güvenli, konforlu ve eğlenceli bir seyahat geçirebilmesi için düzenlenmiştir. Vagonların içerisinde ses ve ısı izolasyonu bulunmaktadır. İzolasyon sayesinde kışın sıcak ve yazın serin bir konfor ortamı oluşturulmuştur. Yolcular kabin içerisinde sıcaklık ayarını manuel olarak kendileri yapabilmektedir. TCDD Taşımacılık her yıl yüzlerce sefere kompartımanlı vagonlar ile çıkmaktadır. Vagonların iç yüzeyleri SMC kaplama ile donatılmıştır. Vagonların içerisinde dış ve iç hava sıcaklığını otomatik olarak algılayabilen sistemler bulunmaktadır. Böylece ısıtma ve soğutma sistemleri, aydınlatma ile birlikte otomatik olarak hava durumu, yolcu durumu ve aydınlatma durumuna göre otomatik olarak kendini ayarlayabilmektedir.

Pulman vagonlarında yer alan koltuk sistemi genellikle 2+1 oturma düzenine sahiptir. Konvansiyonel hatlarda Pulman vagonlar farklı şekillerde konfigüre edilebilmektedir. Genellikle kısa mesafeli sefer yapan tren setlerinde sadece pulman vagon bulunabilmektedir. Yolcuların güvenlik ve konfor şartları bu vagonlarda ön plandadır. Vagonun koltukları ergonomik olarak yolcu konforu yüksek olacak şekilde tasarlanmış ve aralıkları geniş koltuklardan oluşmaktadır. Oturma düzeninde koltuklarla birlikte katlanabilir ve sabit masalar tasarıma eklenmiştir. Bu vagonlarda koltuk üzerine eşya ve malzemelerin yolculuk esnasında güvenli bir şekilde taşınmasını sağlayabilmek için bagaj tasarlanmıştır. Vagon içerisinde belirli bölgelerde prizler bulunmaktadır. Vagonun giriş ve çıkışında tuvalet-lavabo bulunmaktadır. Ek olarak içerisinde evcil hayvan taşımacılığına izin verilen tek vagonudur.

Örtülü kuşetli vagonlarda kemerleri söküldüğünde kompartıman içerisinde dört adet yatak şekline dönüşen iki kişilik karşılıklı koltuklar bulunmaktadır. Yolcular için konforlu, temiz ve dinlendirici bir seyahat sağlanmaktadır. Kolayca katlanabilen masalar koltukların arasında yerleştirilmiştir. Vagon içerisinde; bagaj, WC, lavabo, elektrik prizi bulunmaktadır. Örtülü kuşetli vagonların farklı tipleri tren seferlerinde kullanılabilmektedir.

Yemekli vagonlarda yolcu taşımacılığı yapılmamaktadır. Vagon sadece yemek için kullanılmaktadır. Vagonun tasarımı restoranı andıracak bir konseptte oluşturulmuştur. Vagon içerisinde ikili birbirine bakan koltuklar ve arasında masa bulunmaktadır. Masa dört kişinin rahat bir şekilde kullanabileceği yapıda tasarlanmıştır.

3.1.4. Kent içi raylı sistemler

3.1.4.1 Metro

Uluslararası Toplu Taşıma Birliği (UITP), metro sistemlerini “kendi yollarında çalışan ve genel yol ve yaya trafiğinden ayrılmış” kentsel yolcu taşıma sistemleri olarak tanımlamaktadır. Ağır demiryolu (çoğunlukla Kuzey Amerika'da) ve ağır şehir içi raylı sistem terimleri esasen “metro” terimiyle eş anlamlıdır. Ağır raylı sistemler de özel olarak “elektrikli demiryolu” olarak tanımlanır.

Metro ile hafif raylı sistem ve banliyö treni gibi diğer toplu taşıma modları arasındaki ayrım çizgisi her zaman net değildir. Metronun hafif raylı sistemlerden farkı trafikten ayrılmasıdır. Hafif raylı sistemler, yolları paylaşabilir veya hemzemin geçitlere sahip olabilirken bir metro sistemi; hemen hemen her zaman, yayalara ve diğer trafiğe erişimi olmayan, hemzemin olarak ayrılmış özel bir geçiş hakkına sahiptir. Banliyö veya hafif raylı sistemin aksine, metro sistemleri öncelikle şehir içinde ulaşım için kullanılır. Daha yüksek hizmet frekanslarına ve önemli ölçüde daha yüksek yolcu kapasitelerine sahiptir. Ayrıca, çoğu metro sistemi, yük trenleri veya şehirler arası demiryolu hizmetleri ile rayları paylaşmaz. Sistemin adı, dahil etme veya hariç tutma için bir kriter değildir. Bazı şehirler, metroyu herhangi bir hızlı geçiş bileşeni olmayan bir toplu taşıma hattı için kullanmaktadır. Bazı sistemler, ortak bir ad altında daha büyük sistemin bir parçası olarak hafif metro veya hafif raylı sistem hatlarını da içermektedir. Bunlar listelenmiştir, ancak hafif raylı hatlar sağlanan ağ verilerinde sayılmaz. Bazı toplu taşıma ağları, metro sistemlerinin teknik düzeyine ve hizmet standartlarına uygundur ancak şehrin çok dışına uzanmaktadır hatta bazen banliyö demiryolu olarak bilinmektedir. Bunlar bu listeye dahil değildir.

3.1.4.2 Hafif raylı sistemler ve tramvaylar

Hafif raylı sistemler ve tramvaylar, kentsel toplu taşıma biçimleridir. Bazı istisnalar dışında, dünya genelinde tramvaylar ve hafif raylı sistemler neredeyse yalnızca yolcu taşımacılığında kullanılmaktadır. Kuzey Amerika'da genellikle “streetcar”, “trolleycar” veya “trolley” olarak bilinen tramvay, sabit raylar üzerinde çalışan ve yol alanını diğer trafik ve yayalarla paylaşarak sokaklarda seyahat etmek üzere tasarlanmış bir araçtır. Çoğu tramvay sistemi, ya yolların merkezi rezervasyonu boyunca ya da tamamen ayrılmış yollarda çalışmaktadır. Güzergahın bu bölümü “ayrılmış geçiş hakları” olarak adlandırılmaktadır. Bazı tramvay sistemleri, çoğunlukla ayrılmış raylarda çalışmaktadır. Birleşik Krallıktaki tramvay sistemlerinin çoğu, eski demiryolu hizalamalarını kullanmaktadır.

Atlı tramvaylar ilk olarak 19. yüzyılın başında tanıtılmıştır. İlk elektrikli tramvay 1881'de Almanya'da çalışmaya başlamıştır. Mevcut atlı tramvaylar kademeli olarak elektrikli çalışmaya dönüştürülmüştür. Raylara ihtiyaç duymadan lastik tekerlekler üzerinde çalışan motorbüs ve trolleybüslerin ortaya çıkmasıyla birlikte tramvaylar gözden düşmeye başlamıştır. Britanya'da, 1962'nin sonunda, biri hariç tüm tramvay sistemi kapanmıştır. Kuzey Amerika'da, 1960'ların ortalarında, küçük bir avuç tramvay dışında hepsi kaldırılmıştır. Avrupa kıtasında birçok sistem aşamalı olarak modernleştirilmiştir.

“Hafif raylı sistem” terimi, geleneksel demiryollarından daha düşük kapasiteye ve daha düşük hıza sahip daha küçük araçların kullanıldığı demiryolu operasyonlarını tanımlamak için kullanılmaktadır. Hafif raylı sistem altyapısının inşası ve bakımı ucuz olacak şekilde tasarlanmıştır. Hafif raylı sistem, kısa şehir içi ve şehirlerarası yolculukları karşılayan bir ara ulaşım modudur. Duraklar, genellikle banliyö demiryollarından daha yakındır, yerel otobüs güzergahlarından daha uzaktır.

3.1.4.3 Monoray

Monoray, tek destek ve kılavuz yolu olarak çalışan tek bir raya dayalı, ray tabanlı bir ulaşım sistemidir. Monoray ismi, mono (bir) ve ray kelimelerinin kısaltılmasından, 1897 gibi erken bir tarihte metal rayların kullanıldığı ilk sistemlerden kaynaklanmaktadır. Monoray sistemleri, havalimanı transferi ve bazı orta kapasiteli metro sistemlerinin ihtiyaç duyulduğu hatlarda kullanılmaktadır.

Monoraylar genellikle şehir içi yollarda trafiği etkilememesi için yükseltilmiş hatlarda kullanılmaktadır. Monoray araçlar genellikle ilk bakışta diğer hafif raylı araçlara benzer ve hem insanlı hem de insansız olabilir. Diğer gelişmiş hızlı geçiş sistemlerinde olduğu gibi, bazı monoraylar lineer asenkron motorla tahrik edilir. Birçok çift raylı sistemle ortak olarak, araç gövdeleri bojiler aracılığıyla kirişe bağlanır ve kurbaları dönebilmesine izin verir. Ek olarak monoraylarda pantograf kullanılmamaktadır.

3.2. Türkiye de Üretilen Raylı Sistem Araçları

DMU açılımı “Dizel Çoklu Birim” anlamında dizel tahrikli araçlardan oluşan tren setleridir. Konfigürasyon yapısı DM-M-DM biçiminde üç vagona oluşmaktadır. DM tahrikli araç anlamına gelmektedir. Yapıya M vagonları eklenerek toplam vagon sayısı artırılabilir. Maksimum sekiz araçlı bir tren seti oluşturulabilmektedir. Araçların kendi bünyelerinde dizel motor, hidrodinamik şanzıman ve yardımcı devreleri mevcuttur. Bu birimlere ihtiyaç halinde ek enerji oluşturabilmeleri için jeneratörleri bulunmaktadır. M vagonu 4 normal, 1 adet engelli girişine ve tuvalet-lavabo kabineye sahiptir. Dizel motorlu araçlarda ise bunlara ek yolcu koltukları ve operatör kabini bulunmaktadır.

Tablo 3.1. DMU tren setinin teknik bilgileri

Tampondan Tampona Tren Seti Boyu	801.000 mm
Boji Göbek Eksenleri Arası Mesafe	19.000 mm
Vagon Genişliği	2.825 mm
Vagon Yüksekliği	4.050 mm
Maksimum İşletme Hızı	140 km/s
Toplam Yolcu Kapasitesi	196 kişi (2 engelli)

TVS-2000 Kompartımanlı Vagon serisi TÜVASAŞ tarafından üretilen yolcu taşımacılığında kullanılan vagonlardandır. Yolcu konforu ve emniyeti gözetilerek özgün ve dekoratif bir tasarım yapılmıştır. Konstrüksiyon yapısı hafif ve rijit çelik bir yapıdan oluşmaktadır. Yolcu konforunu arttırmak için yapı, ısı ve ses izolasyonu ile donatılmıştır. İç dekorasyonda modüler tasarım anlayışı ile üretilmiş SMC kaplama panelleri kullanılmıştır. İçerisinde 66 kişilik toplam 11 adet kompartıman bulunmaktadır. İklimlendirme sistemi manuel müdahaleye ek olarak otomatik ısı kontrol sistemine

sahiptir. 160 km/s süratlık yolculuk sırasında yolculara gelen titreşimleri sönmüleyebilecek ikincil süspansiyonlar bojilerde bulunmaktadır.

Tablo 3.2. TVS-2000 kompartımanlı vagonunun teknik bilgileri

Tampondan Tampona Vagon Boyu	26.400 mm
Boji Göbek Eksenler Arası	19.000 mm
Vagon Genişliği	2.825 mm
Vagon Yüksekliği	4.050 mm
Araç Ağırlığı (Boş / Dolu)	45 / 50 ton
Maksimum Hız	160 km/s
Kompartıman Düzeni	11 Kompartıman, 3+3
İklimlendirme Sistemi	Isıtma: 40 kW, Soğutma: 35 kW, Havalandırma: 1200 m ³ /h

TVS-2000 Kuşetli Vagon serisi TÜVASAŞ tarafından üretilen ve yolcu taşımacılığında kullanılan vagonlardandır. Yolcu konforu ve emniyeti gözetilerek özgün ve dekoratif bir tasarım yapılmıştır. Konstrüksiyon yapısı hafif ve rijit çelik bir yapıdan oluşmaktadır. Yolcu konforunu arttırmak için yapı ısı ve ses izolasyonu ile donatılmıştır. İç dekorasyonda modüler tasarım anlayışı ile üretilmiş SMC kaplama panelleri kullanılmıştır. Kuşetli vagon 4 kişilik 10 adet yolcu kompartımanına ek olarak 1 adet personel kompartımanına sahiptir. Gündüz oturmak ve geceleri yatma imkanı sağlayacak şekilde ergonomik olarak tasarlanmış koltukları mevcuttur. Uzun yolculuklar için oluşturulmuştur. İklimlendirme sistemi manuel müdahaleye ek olarak otomatik ısı kontrol sistemine sahiptir. 160 km/s süratli yolculuk sırasında yolculara gelen titreşimleri sönmüleyebilecek ikincil süspansiyonlar bojilerde bulunmaktadır.

Tablo 3.3. TVS-2000 kuşetli vagonunun teknik bilgileri

Tampondan Tampona Vagon Boyu	26.400 mm
Boji Göbek Eksenler Arası	19.000 mm
Vagon Genişliği	2.825 mm
Vagon Yüksekliği	4.050 mm
Araç Ağırlığı (Boş / Dolu)	45 / 50 ton
Maksimum Hız	160 km/s
Kompartıman Düzeni	10 Kompartıman
İklimlendirme Sistemi	Isıtma: 40 kW, Soğutma: 35 kW, Havalandırma: 1200 m ³ /h

TÜVASAŞ tarafından tasarlanan ve kabin içi tavan klimasına sahip olarak üretilen ilk yolcu vagonu TVS 2000 Lüks Pulman Yolcu Vagonu'dur. Yolcu konforu ve emniyeti gözetilerek özgün ve dekoratif bir tasarıma ek estetiğe önem veren özgün bir vagonudur. Konstrüksiyon yapısı hafif ve rijit çelik bir yapıdan oluşmaktadır. Yolcu konforunu arttırmak için yapı ısı ve ses izolasyonu ile donatılmıştır. İç dekorasyonda modüler tasarım anlayışı ile üretilmiş SMC kaplama panelleri kullanılmıştır. Koltuklar uzun yolculuklarda yolcu konforunu sağlayacak şekilde ergonomik olarak tasarlanmıştır. İklimlendirme sistemi manuel müdahaleye ek olarak otomatik ısı kontrol sistemine sahiptir. 160 km/s süratli yolculuk sırasında yolculara gelen titreşimleri sönmüleyebilecek ikincil süspansiyonlar bojilerde bulunmaktadır.

Tablo 3.4. TVS-2000 lüks pulman vagonunun teknik bilgileri

Tampondan Tampona Vagon Boyu	26.400 mm
Boji Göbek Eksenler Arası	19.000 mm
Vagon Genişliği	2.825 mm
Vagon Yüksekliği	4.050 mm
Araç Ağırlığı (Boş / Dolu)	45 / 50 ton
Maksimum Hız	160 km/s
Oturma Yer Sayısı	60 Kişi / 2+1 Yatar Döner Koltuk
İklimlendirme Sistemi	Isıtma: 40 kW, Soğutma: 35 kW, Havalandırma: 1200 m ³ /h

TVS-2000 Yataklı Vagon serisi TÜVASAŞ tarafından üretilen yolcu taşımacılığında kullanılan vagonlardandır. Yolcu konforu ve emniyeti gözetilerek özgün ve dekoratif bir tasarım yapılmıştır. Konstrüksiyon yapısı hafif ve rijit çelik bir yapıdan oluşmaktadır. Yolcu konforunu arttırmak için yapı ısı ve ses izolasyonu ile donatılmıştır. İç dekorasyonda modüler tasarım anlayışı ile üretilmiş SMC kaplama panelleri kullanılmıştır. Yataklı vagonlar içerisinde 2 kişilik yatak olmak üzere 10 yolcu kompartımanı ve 1 yataklı personel kompartımanından oluşmaktadır. Gündüz oturmak ve geceleri yatma imkânı sağlayacak şekilde ergonomik olarak tasarlanmış koltukları mevcuttur. Uzun yolculuklar için oluşturulmuştur. İklimlendirme sistemi manuel müdahaleye ek olarak otomatik ısı kontrol sistemine sahiptir. 160 km/s süratli yolculuk sırasında yolculara gelen titreşimleri sönmüleyebilecek ikincil süspansiyonlar bojilerde bulunmaktadır.

Tablo 3.5. TVS-2000 yataklı vagonunun teknik bilgileri

Tampondan Tampona Vagon Boyu	26.400 mm
Boji Göbek Eksenler Arası	19.000 mm
Vagon Genişliği	2.825 mm
Vagon Yüksekliği	4.050 mm
Araç Ağırlığı (Boş / Dolu)	45 / 50 ton
Maksimum Hız	160 km/s
Yatak Sayısı	20
İklimlendirme Sistemi	Isıtma: 40 kW, Soğutma: 35 kW, Havalandırma: 1200 m ³ /h

TVS-2000 Yataklı Vagon serisi TÜVASAŞ tarafından üretilen yolcu taşımacılığında kullanılan vagonlardandır. Kabin içi ergonomik olarak tasarlanmış 14 yemek masasından oluşmaktadır. 55 kişinin aynı anda yemek yemesine imkan sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Yolcu konforu ve emniyeti gözetilerek özgün ve dekoratif bir tasarım yapılmıştır. Konstrüksiyon yapısı hafif ve rijit çelik bir yapıdan oluşmaktadır. Yolcu konforunu arttırmak için yapı ısı ve ses izolasyonu ile donatılmıştır. İç dekorasyonda modüler tasarım anlayışı ile üretilmiş SMC kaplama panelleri kullanılmıştır. Havalandırma için mutfak tarafında fanlar kullanılmıştır. Mutfak malzemeleri paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiştir. 160 km/s yolculuk sırasında yolculara gelen titreşimleri sönmüleyebilecek ikincil süspansiyonlar bojilerde bulunmaktadır.

Tablo 3.6. TVS-2000 yemekli vagon teknik bilgileri

Tampondan Tampona Vagon Boyu	26.400 mm
Boji Göbek Eksenler Arası	19.000 mm
Vagon Genişliği	2.825 mm
Vagon Yüksekliği	4.050 mm
Araç Ağırlığı (Boş /Dolu)	45 / 50 ton
Maksimum Hız	160 km/s
Oturma Yer Sayısı	55
İklimlendirme Sistemi	Isıtma: 40 kW, Soğutma: 35 kW, Havalandırma: 1200 m ³ /h

Konvansiyonel hatlara ek olarak ülkemizde yabancı ve yerli ortakların oluşturduğu firmalar farklı demiryolu sektörlerine yolcu taşımacılığında kullanılan araçların üretimini gerçekleştirmektedir. Hyundai-Rotem ve TCDD, ülkemizdeki yerli ortaklarla birlikte 2006 yılı içerisinde hafif raylı sistem, tren setleri ve hızlı tren imalatı yapabilmek için EUROTEM firmasını kurmuştur. Fabrika kurulumundan itibaren 84 İstanbul metrosu aracı, 75 adet banliyö treni bölgesel üretimi ve montajı, 68 adet Yenikapı metro aracı, 300 adet Marmaray aracı, 120 adet İZBAN aracı, 38 adet İzmir, 18 adet Antalya tramvay aracı üretimi gerçekleştirmiştir. Yıllık 200 adet demiryolu aracı üretim kapasitesine sahiptir.

Bursa'da faaliyet gösteren Durmaray, 2009 yılında kurduğu Ar-Ge merkezi ile 2012 yılında İpekböceği isimli tramvayı ülkemize kazandırmıştır. Buna ek olarak ilerleyen yıllarda 2016'da Panorama tramvayını geliştirmiştir. Araç üretimine ek olarak sistemin entegre edilmesi amacıyla; tasarım, projelendirme, yazılım, montaj, test, kabul ve devreye alma süreçlerini yöneterek uygulamaları gerçekleştirmektedir.

Fabrika bünyesinde üretilen araçların testlerini gerçekleştirebilmek için yaklaşık 1300 metrelik farklı yatay kurp çaplarında ve farklı eğim açlarına sahip test alanı bulunmaktadır. Durmaray tarafından üretilen ve geliştirilen araçlar Samsun, Kocaeli ve Bursa illerimizde aktif olarak kullanılmaktadır. Firmanın ihracat için projeleri bulunmaktadır.

Ülkemize yerli araç geliştirme ve bu alanda ihracat çalışmaları yapabilen bir diğer firma, Almanya ve Ankara da üretim tesisi bulunan, Bozankaya firmasıdır. Demiryolu aracı üreten dünya devi firmalara çelik ve alüminyum gövde ve alt sistem üretimi gerçekleştirmektedir. Alçak taban tramvay tasarımı ve imalatını 2015 yılında gerçekleştirmiştir. Ülkemizde kullanılan 34 metrelik 32 adet 6 parçadan oluşan tramvay seti üretilmiş ve kullanıma alınmıştır. Üretilen tramvaylar alçak tabanlıdır. Bozankaya ek olarak Tayland'da Siemens firması ile ortak demiryolu araçları üretimi gerçekleştirmektedir.

3.3 Raylı Sistem Araçları Aydınlatma Ve İklimlendirilme Sistemleri

Yolcu vagonlarında tüketilen enerjinin belirli bir kısmı aydınlatma ve iklimlendirme sistemleri tarafından kullanılmaktadır.

3.3.1 Raylı sistemlerde aydınlatma

Yolcu vagonları ve tren setleri floresan ve led ampuller ile aydınlatılmaktadır. Bunlar iki ana başlık altında sınıflandırılmaktadır:

- 220 VAC gerilim ile aydınlatma: Aydınlatma sisteminde hattan alınan gerilim aydınlatma için kullanılmaktadır. Çoğunlukla dizel ve elektrik ile çalışan tren kabinlerinde mevcuttur.
- Güç kaynağı ile beslenen 24 VDC akım ile çalışan aydınlatma: Genellikle normal tip yolcu vagonlarında kullanılmaktadır. Tren hareketsiz kaldığında veya vagonlar birbirinden ayrıldıklarında oluşan enerji kesintilerinden etkilenmemeleri için akü ile aydınlatmanın devamı sağlanmaktadır. Bu akım sistem içerisindeki transistörlü balast ile 220 VAC gerilime dönüştürülerek vagon içi aydınlatma sağlanmaktadır.

Yolcu konforu için vagon içi bölgelerde koltuk üzerinde montajlı profil üzerine yerleştirilmiş ve her yolcu için manuel yönlendirme hizmeti oluşturan okuma lambaları bulunmaktadır. Diğer yolcuları rahatsız etmeyecek bir şekilde 600 mm çapında yolcuya aydınlatma hizmeti sağlanmaktadır.

3.3.2 Raylı sistemlerde iklimlendirme

3.3.2.1 Raylı sistemlerde soğutma

Demiryolları yolcu taşımacılığında kabin içi konforu sağlayabilmek için iç ısısının 18 °C ile 22 °C sıcaklıkları arasında olmalıdır. Farklı hava koşullarında iç ve dış hava sıcaklıkları arasında oluşan farkın yolcu konforunu etkilemesini engellemek için iklimlendirme sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç kabinlerde klima sistemleri kullanılarak giderilmektedir.

Klima; ortam sıcaklığını farklı çevrimler sağlayarak değiştirebilmekte, CO₂ miktarını azaltmakta ve kabin içi nem miktarını dengeleyebilmektedir. Kapalı ortamlarda yolcuların bulundukları ortamların konforunu arttırabilmek için ortam sıcaklığına müdahale edilmesi gerekmektedir. Yolcuların konforu çevre sıcaklığı bulunan ortamdaki hava sıcaklığıyla havanın nem oranına bağlıdır. Aşırı nem, aşırı sıcaklığa göre daha fazla rahatsız edici olabilmektedir. Ortamdaki nem miktarı arttıkça yolcunun vücudunun sıcaklık karşısındaki reaksiyonu yavaşlamaktadır. Bundan dolayı klimanın

hava sıcaklığını değiştirmesine ek olarak nem oranını da ayarlaması gerekmektedir. Yapılan bu proseslerin tümü iklimlendirme olarak tanımlanmaktadır. Bunları sağlamak için kullanılan donanım klima olarak tanımlanmaktadır.

Klima üniteleri, ortamın içindeki sıcak havayı dışarı pompalayarak atarken, soğuk havayı odaya geri verir. Bu şekilde sıcaklığı düşürmektedir. Sıvı gaz haline geldiğinde ısıyı emerek tekrar sıvılaşmaktadır. Klima sistemleri, standart bir buzdolabı gibi çalışmaktadır. İlk olarak odadan gelen sıcak hava sisteme çekilir. Bu hava, içerideki soğuk evaporatör borularının üzerinden geçerek havayı soğutur ve nem giderici fazla nemi uzaklaştırır. Bu arada, soğutucu borularından akan soğutucu, esen havadan gelen ısıyı emer ve buharlaşarak soğuk bir sıvıdan sıcak bir gaza dönüşür. Bu sıcak hava dışarıya pompalanırken, soğutucu akışkan bir kompresör ünitesinden ve onu tekrar soğuk bir sıvıya dönüştüren bir kondansatörden akar. Soğuk hava daha sonra odaya yeniden verilir ve burada mevcut hava ile karışır. Sıcaklık ve nem azaltılır.

Bir klima ünitesinin içinde; soğutucunun durumunu, basıncını ve sıcaklığını manipüle eden, ünitenin işini yapmasına ve odayı soğutmasına izin veren bir dizi farklı bileşen bulunmaktadır. Raylı sistem araçlarında bulunan klimalarda normal basınçta kendiliğinden buharlaşan ve buharlaşırken içerisinde bulunduğu havanın sıcaklığını emerek bulunduğu ortamı soğutan farklı çeşitlerde soğutma gazları kullanılmaktadır. Soğutucu akışkanların bu işlemleri yapabilmesi için bazı özelliklere sahip, emniyetli ve ekonomik olması gerekmektedir. Soğutma makinelerinin ilk dönemlerinde amonyak ve karbondioksit kullanılmıştır. Günümüzde ise freon gibi laboratuvar ortamında üretilen sıvılar kullanılmaktadır.

Soğutucu akışkanların sahip olması gereken özellikler şunlardır:

- Buharlaşma ve sıvılaşma basıncı uygulanabilir değerlerde olmalıdır.
- Buharlaşma sıcaklığı olabildiğince düşük olmalıdır.
- Kimyasal bütünlüğünü korumalı, alev almamalı, insan sağlığını etkiyecek zehirli maddeler içermemeli ve metal malzemelerle kimyasal etkileşime girmemelidir.
- Maliyeti düşük ve temin edilebilirliği yüksek olmalıdır.

Mevcut klimalarda en çok kullanılan soğutucu akışkanlar; Freon 12, Freon 22, Freon 134a, Freon 407c, Freon 410A, Amonyak, Freon 12, Frigen 12, Kaltron 12, Genetron 12, kükürtdioksit, metilklorid freon 12, freon gazının F11, F12, F13, F22, F502

gibi türlerdir. Bileşiminde karbon (C), klor (Cl) ve flor (F) bulunur. Genellikle klima sistemlerinde bu akışkan kullanılmaktadır. F12 soğutucu akışkanının normal basınçta; kaynama noktası -29 °C, donma noktası ise -157 °C'dir. Yoğunluk olarak havadan büyüktür. Renksiz bir akışkandır (Milli Eğitim Bakanlığı, 2013).

3.3.2.2 Raylı sistemlerde kullanılan klimalar

Yolculukta aranan konfor şartları arasında büyük etkiye sahip olan klima demiryolu araçlarında kısa zamanda yaygın bir kullanım alanına ulaşmıştır. Çeken ve çekilen araçlarda kullanılan klimalar, genellikle tavan tipi klimalardır. İklimlendirme uygulanan bölgeler, yolcular üzerinde konfor koşullarını iyileştirmekte ve sağlıklı bir yaşam sağlamaktadır. Bu bilgilere dayanarak klimanın günümüzde bir lüks değil yaşamın içerisinde bulunan önemli bir ihtiyaç haline geldiği görülmektedir. Kapalı mekanların havasının istenilen sıcaklık, nem ve hava temizliğinde tutulması gerekmektedir. Bu taleplerin kontrol altında tutulması ve talebe uygun yönlendirilebilmesi iklimlendirme olarak tanımlanmaktadır. Klima sistemi, yazın içerideki ısıyı dışarıya atarak içeriği serinletmektedir. Bununla birlikte havada bulunan fazla nemi almaktadır. Bu şekilde kabin içerisinde gerekli hızda hava dolaşımı sağlanmış ve hava süzölmüş olmaktadır. Ülkemiz demiryollarında kullanılmakta olan dört tip klimalı vagon bulunmaktadır. Sürekli arıza yapan bu konvertörlerin yerine TÜVASAŞ Ar-Ge çalışmalarını yaparak tamamıyla yerli olan EBU adlı konvertörleri tasarlayıp üretmektedir. Bu konvertörlerin bakım maliyetleri eski konvertörlere göre fazlasıyla düşürülmüştür (Milli Eğitim Bakanlığı, 2013).



Şekil 3.1. TVS 2000 tipi çekilen araç klima sistemi parçaları

3.3.2.3 Raylı sistemlerde ısıtma

Yaşam ortamlarının dünyada kabul edilmiş ve farklı deneylerle test edilmiş belirli sıcaklık aralıklarına sahip olmaları gerekmektedir. Bu değeri demiryolları standardına göre en az 18°C olarak tanımlanmıştır. Bu sıcaklığın üstüne sahip olan ortamlarda klimalar ortamın uygun sıcaklığa düşürülmesini sağlamaktadır. 18°C'nin altındaki sıcaklıklar yolcuların üşümesine neden olur. Soğuk havaya uzun süre maruz kalan yolcularda hastalanmalar görülmektedir. Kabin içi soğuk havanın giderilmesi, sıcaklığın olması gereken aralığa yükseltilmesi için ısıtıcı sistemler kullanılmaktadır.

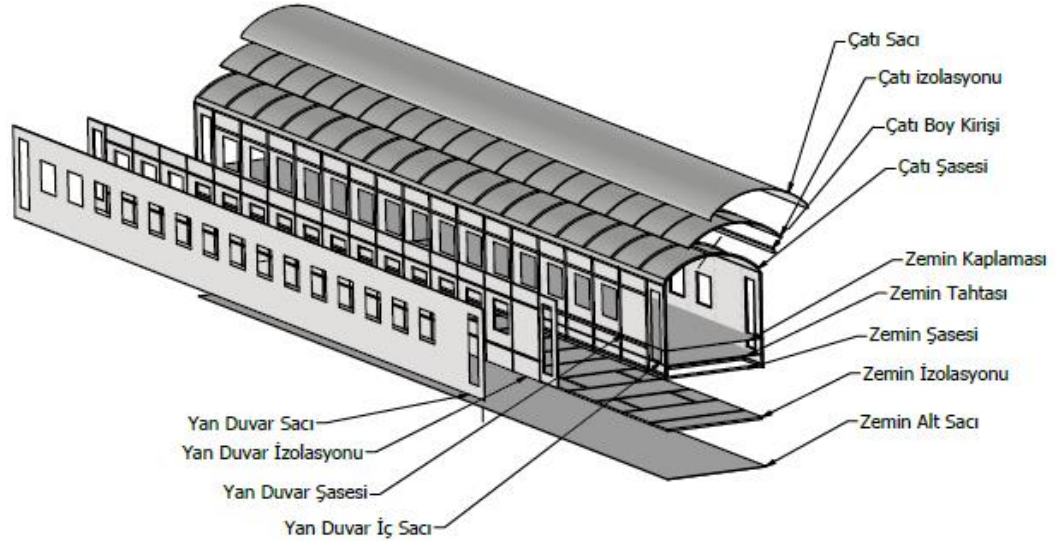
Demiryolu yolcu vagonlarımızda konveksiyon ile ısıtma sistemi kullanılmaktadır. Bu sistemde elektrikli ısıtıcılarda elektrik enerjisini rezistans ile ısı enerjisine çevrilerek havanın ısıtılması sağlanmaktadır. Havanın akışkanlığı ile ısı vagonların içi yayılmaktadır. Vagonda bulunan kontaktörler lokomotif veya jeneratörden elde edilen 1000 VAC ya da 1000 VDC gerilimi vagon içinde bulunan ısıtıcılara göndererek ısınmayı sağlamaktadır. Otomatik ısı sistemlerinde bulunan termostatlar ayarlanarak vagon içi sıcaklığın sabit kalması sağlanmaktadır.

Gelişen teknoloji ile ısıtma sistemleri de farklılaşmaktadır. Günümüzde üç tip farklı ısıtma yöntemi vagonlarda kullanılmaktadır. Bu yöntemler; konveksiyon ile ısıtma, vagon şasesi altında sandık içi tij ile ısıtma ve dışarıdan emilen havanın ısıtılarak fanlar ile vagon içerisine verilmesi şeklindedir (Milli Eğitim Bakanlığı, 2013).

4. NÜMERİK ANALİZ PARAMETRELERİ VE MODELLEME

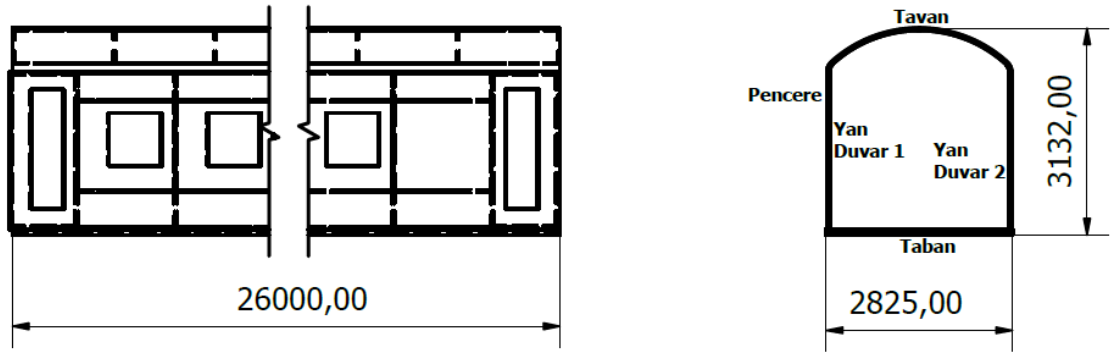
4.1. Vagon Zarf Yapısının İncelenmesi

Demiryolu yolcu taşımacılığında kullanılan vagon çeşitlerinden olan, üretimi ülkemizde gerçekleştirilen konvansiyonel yolcu vagonu modellenmek ve analizde kullanılmak üzere seçilmiştir. Vagonun analiz programında incelenebilmesi için tüm geometrisi teknik özelliklerinde belirtilen ölçülerde Autodesk Inventor programı kullanılarak modellenmiştir. Şekil 4.1’de vagonun hangi parçalardan oluştuğu belirtilmiştir.



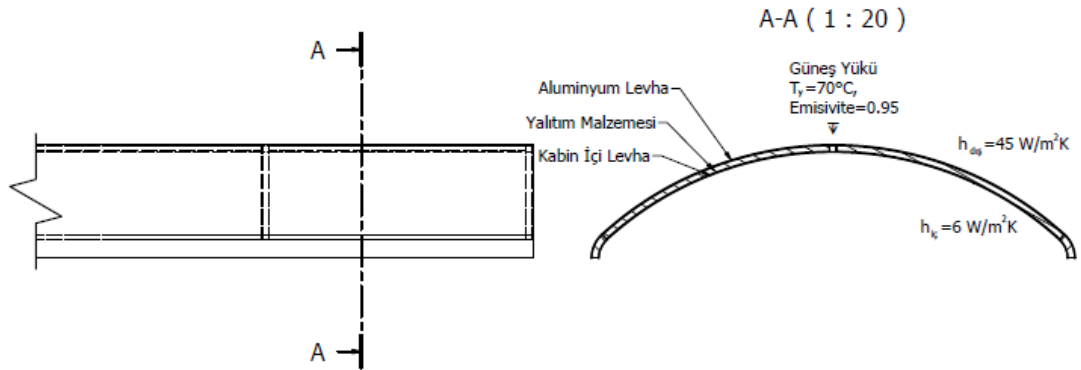
Şekil 4.1. Konvansiyonel vagonun patlatılmış teknik resmi

Vagon modellemesi sonrasında geometri incelenmek üzere dört farklı bölüme ayrılmıştır. Bu bölümler; tavan, taban, yan duvarlar ve pencereden oluşmaktadır. Şekil 4.2’de ayrılan bölümler belirtilmiştir.



Şekil 4.2. Konvansiyonel vagonun geometrik ölçüleri ve bölümleri

Tavan, taban, yan duvarlar ve pencerenin farklı geometri ve malzemelere sahip olmaları, maruz kaldıkları ısı yüklerinin farklı olması sebebiyle ayrı modeller olarak değerlendirilmiştir. Şekil 4.3'te vagonun tavan geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Konvansiyonel vagonun tavan teknik resmi

4.2. Vagon Zarf Yapısının Farklı Yalıtım Malzemesi ve Farklı Yalıtım Kalınlıklarına Göre Modellenmesi

Modelleme ve analizde kullanılmak üzere tavan, taban, yan duvarlar dört farklı kalınlıkta tekrar modellenmiştir. Değişen kalınlıklar, yapıda kullanılan yalıtım malzemesinin değişiminden kaynaklanmaktadır. Kullanılan kalınlıklar; 50 mm, 70 mm, 80 mm ve 90 mm'dir.

Analizde değişen diğer bir parametre farklı kalınlıklarda kullanılan yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısıdır. Tablo 4.1'de gösterildiği şekilde, dört farklı

malzeme için dört farklı ısı iletim katsayısı analize dahil edilmiştir. Bu ısı iletim katsayıları; Ampofo vd. (2004) ve Liu vd. (2011)'nin çalışmalarında kullandığı 0,08 W/mK ve 0,096 W/mK katsayılarına ek olarak sektörde uygulamada kullanılan ısı iletim katsayıları olan 0,03 W/mK ve 0,046 W/mK'dir.

Tablo 4.1. Analizde kullanılan yalıtım malzemelerinin özellikleri

Yalıtım Malzemesi	Isı İletim Katsayısı	Yangına Tepki Sınıfı	Yoğunluk
Poliüretan Sert Köpük	0,03 W/mK	D	30 kg/m ³
Cam Yünü	0,046 W/mK	A1-A2	50 kg/m ³
Ampofo vd. Yalıtım Malzemesi	0,08 W/mK	-	-
Liu vd. Yalıtım Malzemesi	0,096 W/mK	-	-

4.3. Nümerik analiz için parametrelerin belirlenmesi

Analiz için gereken değer olan iç ve dış duvarlarda oluşan konveksiyon katsayısı belirlenmiştir. Kabin içi konveksiyon katsayısı iç ortamlar için tespit edilen ve yararlanılan tipik bir değer olmakla birlikte, dış ortam konveksiyon katsayısı, bu tür uygulamalar için Çin demiryollarında önerilen hesaplama yöntemi ile 80 km/s ortalama hızla hareket eden bir demiryolu aracı için konveksiyon katsayısı 45 W/m²K olarak hesaplanmıştır. İç ortam yüzey konveksiyon katsayısı 6 W/m²K olarak kabul edilmiştir.

Isı transfer katsayısı dış yüzeyde konvektif kabul edilmiş olup, Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır (Liu vd., 2011). Burada; h konveksiyon ısı aktarım katsayısı ve V hızdır.

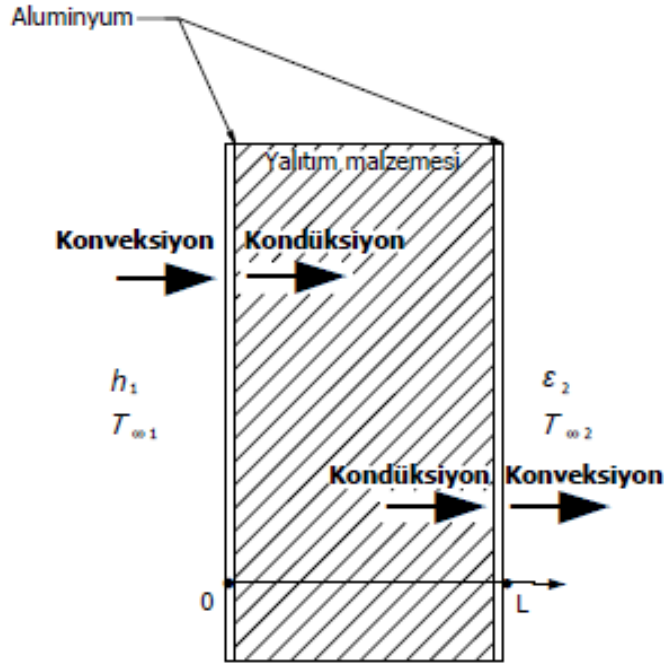
$$h_0 = 9 + 3.5 V^{0.66} \quad (V > 0) \quad (4.1)$$

Isı transfer mekanizmasının vagon zarfı boyunca kondüksiyon, zarfın her iki yüzeyinde ise konveksiyon ile transfer gerçekleşmektedir. Bu durumu belirten denge denklemleri Denklem 4.2 ve Denklem 4.3'teki gibidir (Çengel & Ghajar, 1997). Burada; k ısı iletim katsayısı, h konveksiyon ısı aktarım katsayısı ve T sıcaklıktır.

$$-k \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = h_1 [T_{\infty 1} - T(0, t)] \quad (4.2)$$

$$-k \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = h_2 [T(L, t) - T_{\infty 2}] \quad (4.3)$$

Tren zarfı için konveksiyon sınır şartları Şekil 4.4'te belirtilmiştir.



Şekil 4.4. Tren zarfı için konveksiyon sınır şartları

Analizdeki bir diğer parametre olan iç ve dış ortam sıcaklıkları yaz ve kış mevsimleri için belirlenmiştir. Yaz mevsimi için; iç ortam sıcaklığı 25°C kabul edilerek dış ortam sıcaklığı 30 ve 35 °C, kış mevsimi için; iç ortam sıcaklığı 20°C kabul edilerek dış ortam sıcaklığı 0 ve 10° C ye göre analiz parametrelerine dahil edilmiştir.

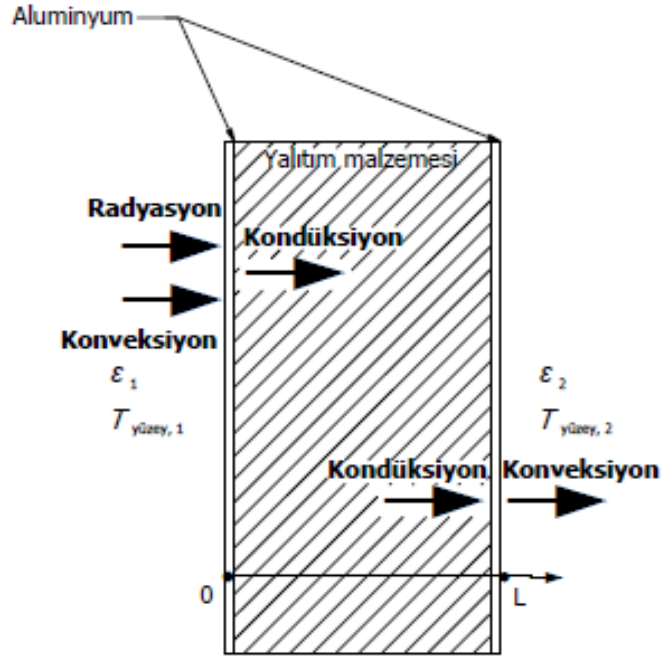
Duvar, cam ve taban için yukarıda belirtilen eşitliklerden yararlanmak mümkün iken, Marcos vd. (2014)'te not ettiği üzere araçların tavan bölümlerinin ısı analizlerinde radyasyon etkisinin dikkate alınması gerekmektedir.

Isı transfer mekanizmasının vagon zarfı boyunca kondüksiyon, zarfın dış yüzeyinde radyasyon ve konveksiyon, zarfın iç yüzeyinde ise konveksiyon ile ısı transferi gerçekleşmektedir. Bu durumu belirten denge denklemleri Denklem 4.4 ve Denklem 4.5'teki gibidir (Çengel & Ghajar, 1997). Burada; k ısı iletim katsayısı, ε emisivite, σ Stefan Boltzman sabiti ve T sıcaklıktır.

$$-k \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = \varepsilon_1 \sigma [T_{yüzey,1}^4 - T(0,t)^4] + h_1 [T_{\infty 1} - T(0,t)] \quad (4.4)$$

$$-k \frac{\partial T(L,t)}{\partial x} = h_2 [T(L,t) - T_{yüzey,2}] \quad (4.5)$$

Tren zarfı için radyasyon sınır şartları Şekil 4.5'te belirtilmiştir.



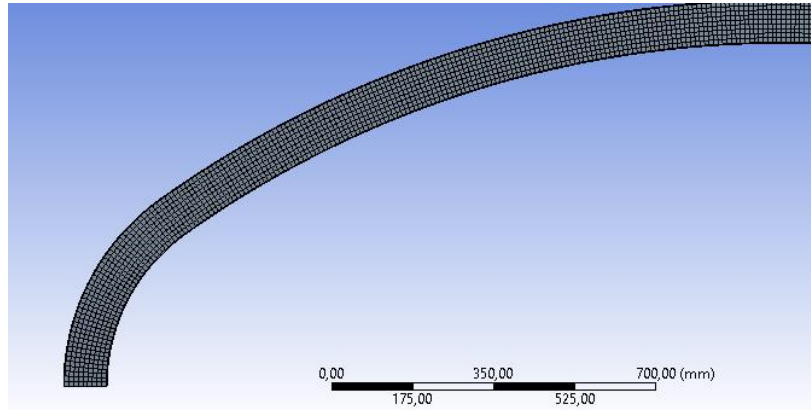
Şekil 4.5. Tren zarfı için radyasyon sınır şartları

Marcos vd. (2014)'te belirttiği üzere, araçların termal analizinde yan yüzeylerden farklı olarak, radyasyon etkisi etkindir ve ihmal edilemez. Bu bölümlere dair yapılacak simülasyonlarda ya da analizlerde sonuçların daha gerçekçi olması için güneş yükünün etkisi ortalama bir sıcaklık ve emisivite değeri ile analize dahil edilmiştir. Değerlerin gerçeğe yakın olabilmesi için benzer geometriye sahip bir yapının belirtilen koşullar altında pik saat sıcaklığı MASTECH MS6540B marka infrared lazer sıcaklık ölçüm cihazı ile Şekil 4.6'da görüldüğü üzere yüzey sıcaklık ve emisivite ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 4.6. MASTECH MS6540B lazer ölçüm cihazı ile benzer bir ürünün güneş altında sıcaklık ölçümü

Modelin taban bölümünün analizinde ise, duvar için belirtilen analize ilave olarak zeminde kullanılan tahta tabaka da analize dahil edilmiştir. Üç boyutlu modeller analiz için ANSYS ortamına aktarılmıştır. Steady state thermal modülü kullanılarak analizler yapılmıştır. Şekil 4.7’de tavan kesitinin analiz ortamındaki ağ yapısı verilmiştir. Ağ yapısına ait kesit, 141.956 nod ve 23.990 elementten oluşmaktadır. Mesh boyutu 10 mm olarak tanımlanmıştır.

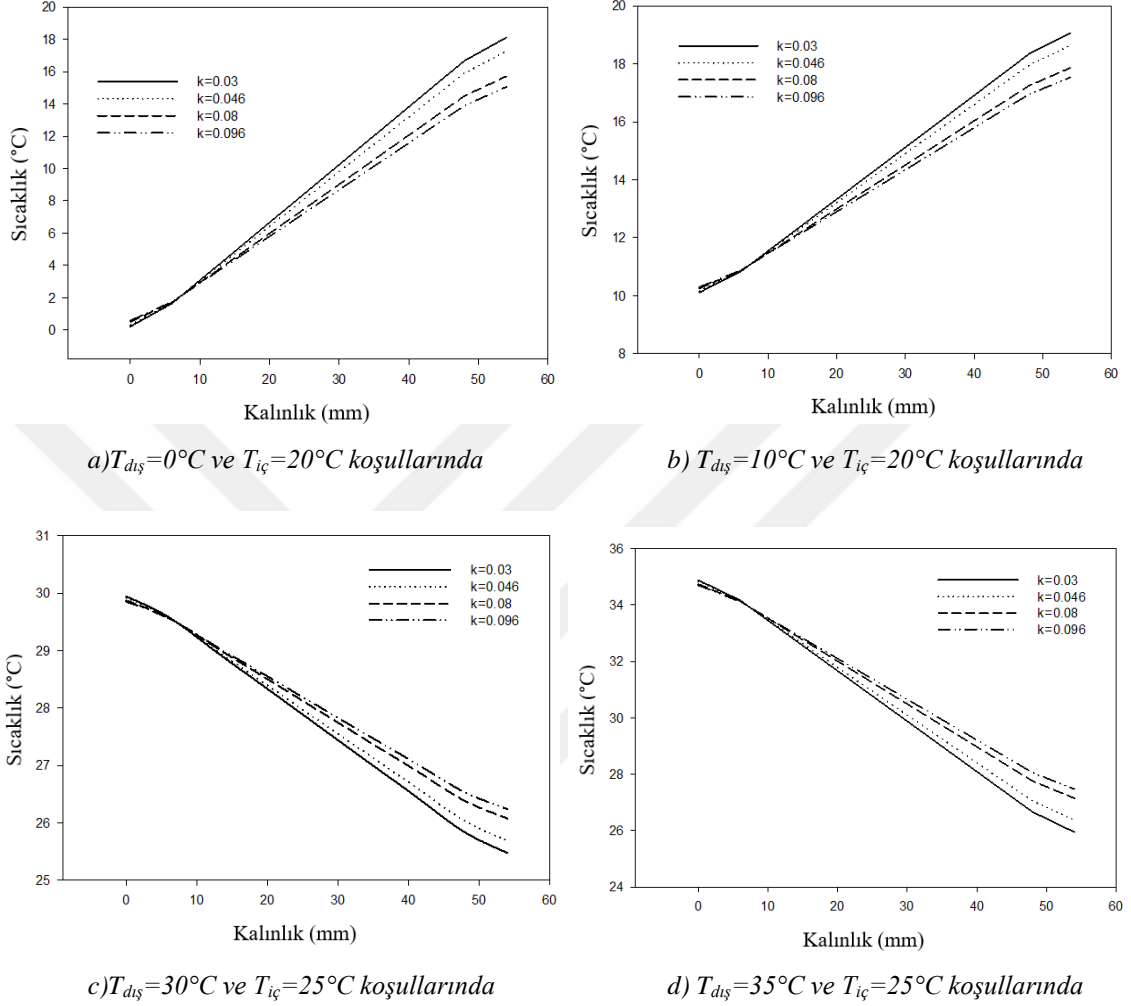


Şekil 4.7. Tavan geometrisine ait ağ yapısı

Sıcaklık konturlarını içeren analiz sonuçları Ek-1’de verilmiştir.

5. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

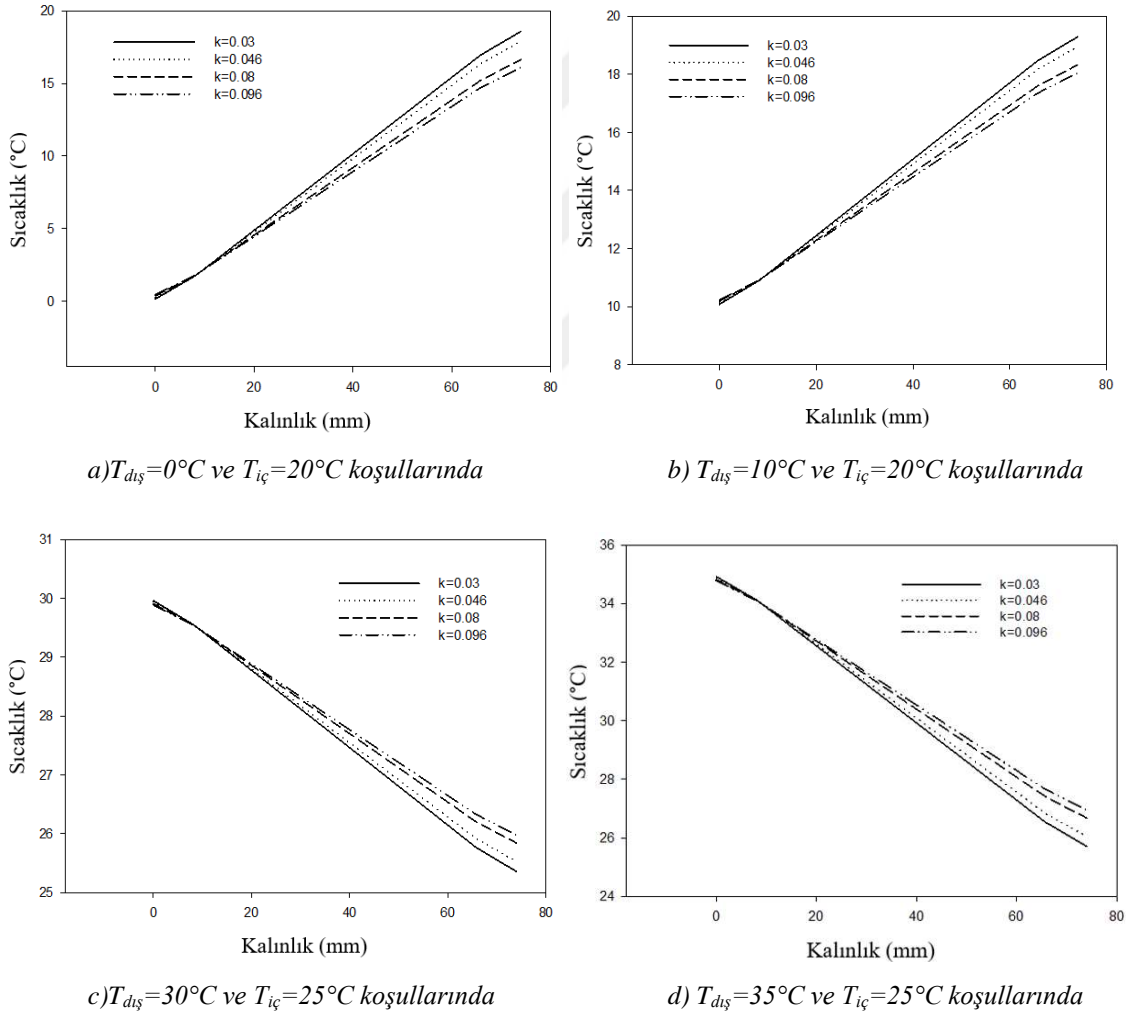
5.1. Yan Duvar Analiz Sonuçları



Şekil 5.1. 50 mm yalıtım kalınlığındaki yan duvarın yaz ve kış koşullarındaki analiz sonuçları

50 mm kalınlığında yalıtım malzemesi bulunan geometri parametrik olarak analiz edilmiştir. Şekil 5.1’de gösterilen sonuç grafikleri dört farklı dış ortam koşulunda dört farklı yalıtım malzemesi için oluşturulmuştur. Beklenildiği üzere aynı kalınlıkta iletkenlik arttırıldığında tren zarfı ısıyı daha iyi iletmektedir. Diğer malzemelere göre iç ve dış ortam sıcaklığı arasındaki fark daha azdır. Şekil 5.1’de görüldüğü üzere malzemeler benzer eğrilere sahip olmalarına rağmen aralarında net bir ayrım bulunmaktadır. Kötü iletken veya iyi yalıtkan anlamına gelen düşük ısı iletim katsayısına sahip malzemelerde sıcaklık farkı daha fazla olmaktadır. Isı iletim katsayısının küçük olması enerjinin daha yavaş iletilmesine dolayısıyla iç sıcaklığın daha iyi korunmasına sebep olmaktadır. Isı iletim

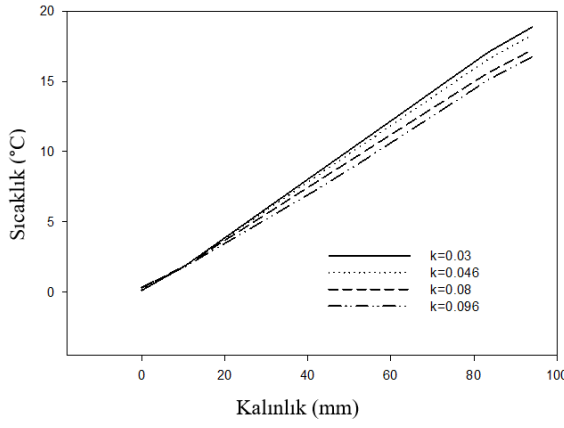
katsayısının büyük olması bunun tersine iletimi hızlandırmakta ve iç sıcaklığın azalmasına sebep olmaktadır. Yaz koşulları değerlendirildiğinde ise ısı iletim katsayısının düşük olması iç ortamı izole etmekte ve aşırı sıcaklık artışını engellemektedir. Isı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan yalıtım malzemesinde yaz koşullarında iç sıcaklığın 25 °C’de tutulamadığı görülürken ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK için iç ortam sıcaklığının bu değere yaklaştığı görülmektedir. Kış mevsimi koşullarında aynı şekilde 20 °C olması beklenen iç ortam sıcaklığı, 0,096 W/mK yalıtım malzemesinde 16 °C’ye kadar düşmekte ve 0,03 W/mK yalıtım malzemesinde 18 °C’de tutulabilmektedir.



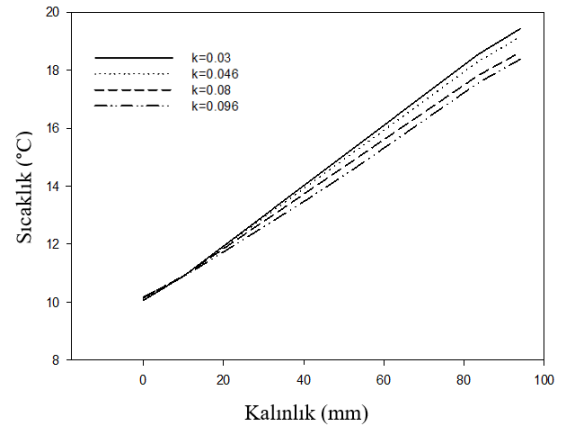
Şekil 5.2. 70 mm yalıtım kalınlığındaki yan duvarın yaz ve kış koşullarındaki analiz sonuçları

Daha kalın bir yalıtım malzemesi olan 70 mm kalınlığındaki yalıtım malzemesinin ısı tepkisi Şekil 5.2’de gösterilmektedir. Eğrilerin genel eğilimleri 50 mm kalınlık için gösterilen Şekil 5.1’deki grafiklere benzemektedir. Kış koşullarında sıcaklık dış kabuktan iç kabuğa doğru yükselirken, yaz koşullarında aynı bölgeler arasında düşmektedir. Bu yükselme ve alçalma eğilimlerinde, ısı iletim katsayısı düşük olan ısıyı daha kötü iletmektedir. Bununla birlikte kış ve yaz koşullarında kabin içerisini daha sıcak veya daha soğuk tutmaktadır. En iyi yalıtkan ($k=0,03$ W/mK) enerji iletimini yavaşlattığı, zarfın her iki tarafını daha iyi oluşturduğu için, bölgeler arası sıcaklık farkı diğer iletken malzemelere göre daha fazladır. Bu durum, $k=0,096$ W/mK olan durum için ortam sıcaklıklarının $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu durumlarda kabin içi sıcaklıkların daha yüksek olmasına yol açarken, en düşük kabin sıcaklıklarının olduğu ortam sıcaklıklarının $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu durum için tam tersi gözlemlenmektedir. Diğer iki malzeme ($k=0,046$ W/mK ve $k=0,08$ W/mK) arasında iletkenlik değerleri yüksekten düşüğe doğru sıralanmıştır.

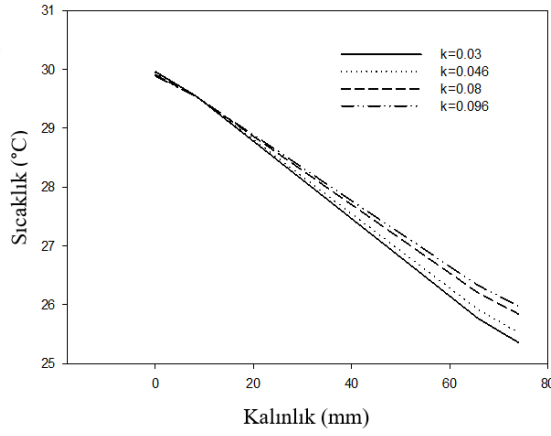
Şekil 5.3’te farklı ısı iletim katsayıları için 90 mm kalınlığındaki yalıtım malzemesinin sıcaklık değişimleri gösterilmektedir. Daha önceki bulgularda olduğu gibi, $k = 0,03$ W/mK ile temsil edilen malzeme, iç ortam sıcaklığını hedef sıcaklığa yakın tutma konusunda $k = 0,096$ W/mK olan malzemeden daha iyi performans göstermektedir. İletkenliği en yüksek olan malzeme ısıyı daha iyi iletmekte ve bu da sırasıyla kış ve yaz simülasyonlarında kabin içinde daha soğuk ve daha sıcak bir ortam oluşmasına neden olmaktadır. Isı iletim katsayıları kademeli olarak $0,03$ W/mK’den $0,096$ W/mK’e yükseldikçe, eğriler de kademeli olarak yükselmektedir. Benzer bir eğilimde olsalar da eğriler arasında net bir ayırım vardır. Altı çizilmesi gereken en önemli nokta, kalınlığın etkisidir.



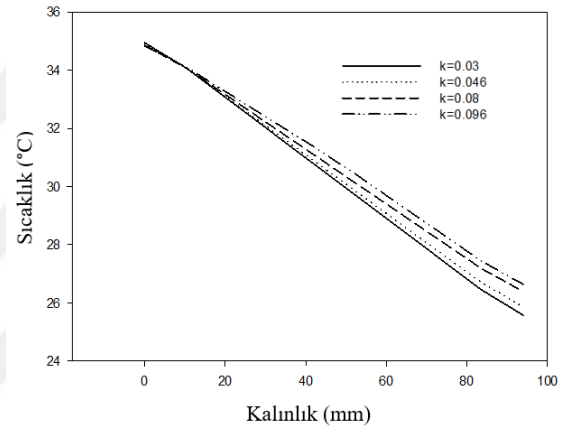
a) $T_{dış}=0^{\circ}C$ ve $T_{iç}=20^{\circ}C$ koşullarında



b) $T_{dış}=10^{\circ}C$ ve $T_{iç}=20^{\circ}C$ koşullarında



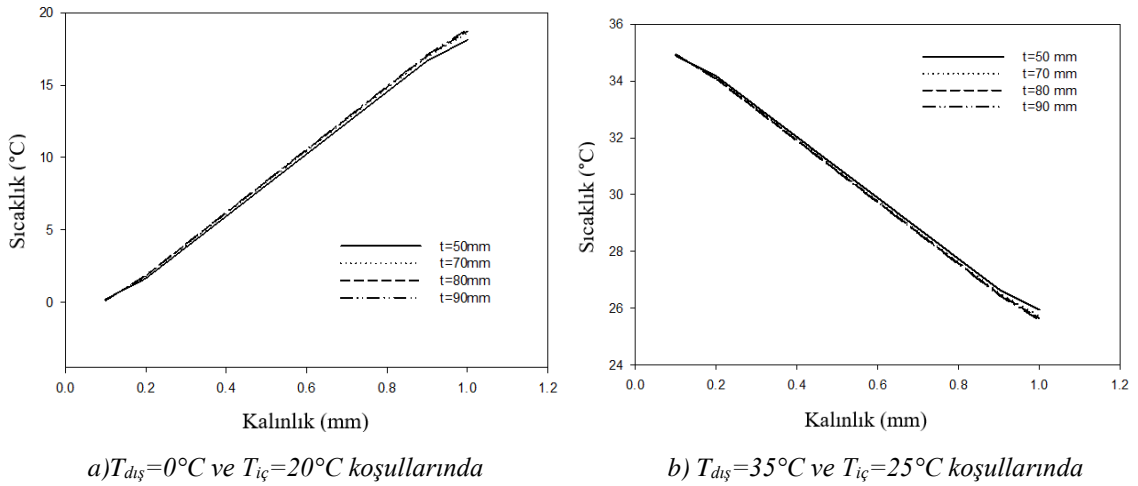
c) $T_{dış}=35^{\circ}C$ ve $T_{iç}=25^{\circ}C$ koşullarında



d) $T_{dış}=35^{\circ}C$ ve $T_{iç}=25^{\circ}C$ koşullarında

Şekil 5.3. 90 mm yalıtım kalınlığındaki yan duvarın yaz ve kış koşullarındaki analiz sonuçları

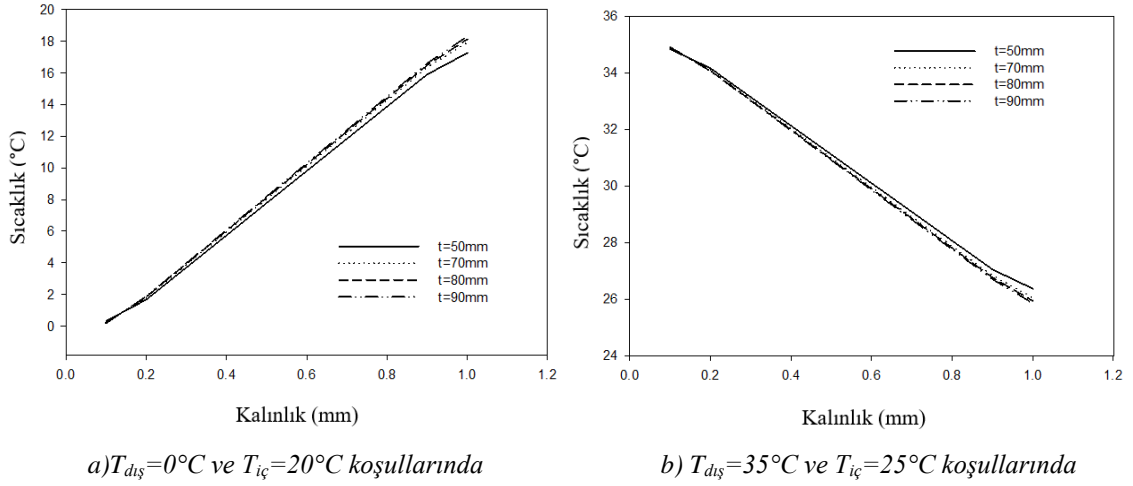
Şekil 5.3'te görüldüğü üzere $k = 0,03$ W/mK yalıtkan olarak daha iyi bir performans gösterse de, kalınlık arttıkça sağlanan yalıtım daha iyi olmaktadır. Kalınlığın artmasının sıcaklık üzerinde oluşturduğu etki için farklı grafikler oluşturulmuştur. Bu etkiler, Şekil 5.4 ve Şekil 5.6'da görülebilmektedir.



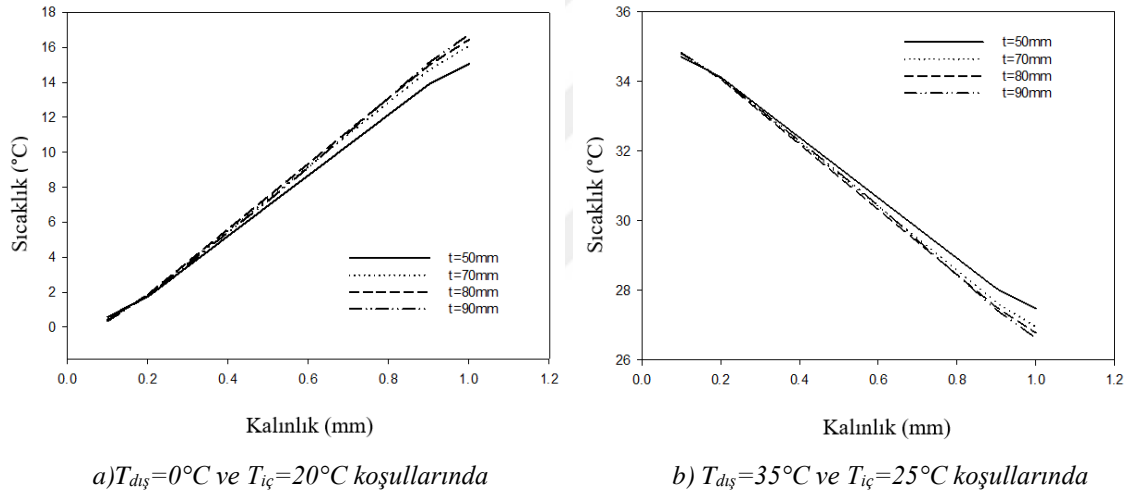
Şekil 5.4. Yan duvarların yaz ve kış koşullarında ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan yalıtım malzemesi için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçları

Yalıtım malzemesi kalınlığının iç ortam sıcaklığı üzerindeki etkisini görmek için ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK ve 0,096 W/mK yalıtım malzemelerinin kış ve yaz koşullarında farklı kalınlıklardaki durumları incelemiştir ve analiz sonuçları Şekil 5.4 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Farklı kalınlıklara sahip modellerin tek bir grafikte karşılaştırılabilmesi için normalizasyon yapılmış ve aynı grafik üzerinde bu şekilde sunulabilmektedir. Şekil 5.4'teki grafiklerle ilgili olarak aynı malzemenin değişen kalınlıkları arasında belli belirsiz bir fark vardır. Araştırılan koşullar altında hemen hemen aynı termal reaksiyonu göstermeleri dışında gözle görülür tek fark, diğerleri arasında en düşük kalınlık olan $t=50$ mm için not edilebilir. Hem kış hem de yaz simülasyonlarında aynı gözlemler raporlanabilir. Çok az fark olsa da, 50 mm kalınlığın ötesinde bu özel malzemede kalınlık değişiminin önemli bir rol oynamadığını söylemek çok yanlış olmayacaktır. 50 mm kalınlığındaki yalıtım malzemesi bu iletkenlik değeri için sınır değer olarak not edilebilir.

Kalınlığın seçilen malzeme üzerindeki etkisinin incelendiği bir diğer şekil ise Şekil 5.5'tir. Bu şekil grubunda, $k = 0,046$ W/mK için, bir kış bir de yaz koşulu için grafikler gösterilmiştir. Görüleceği üzere, bir önceki malzeme de ($k = 0,03$ W/mK), olduğu gibi, değişim eğrileri birbirine çok yakındır ve aralarında belli belirsiz bir fark görülmektedir. Hem, kış koşullarının hem de yaz koşullarının simüle edildiği koşullarda, 50 mm üzerindeki kalınlıklarda değişim eğrileri birbirine çok yakın iken, 50 mm eğrileri her iki koşulda da fark edilecek biçimde gelişmektedir. Bu koşullarda da 50 mm üzerindeki kalınlıkların fark edilecek bir etki yaratmadığı gözlenmektedir.



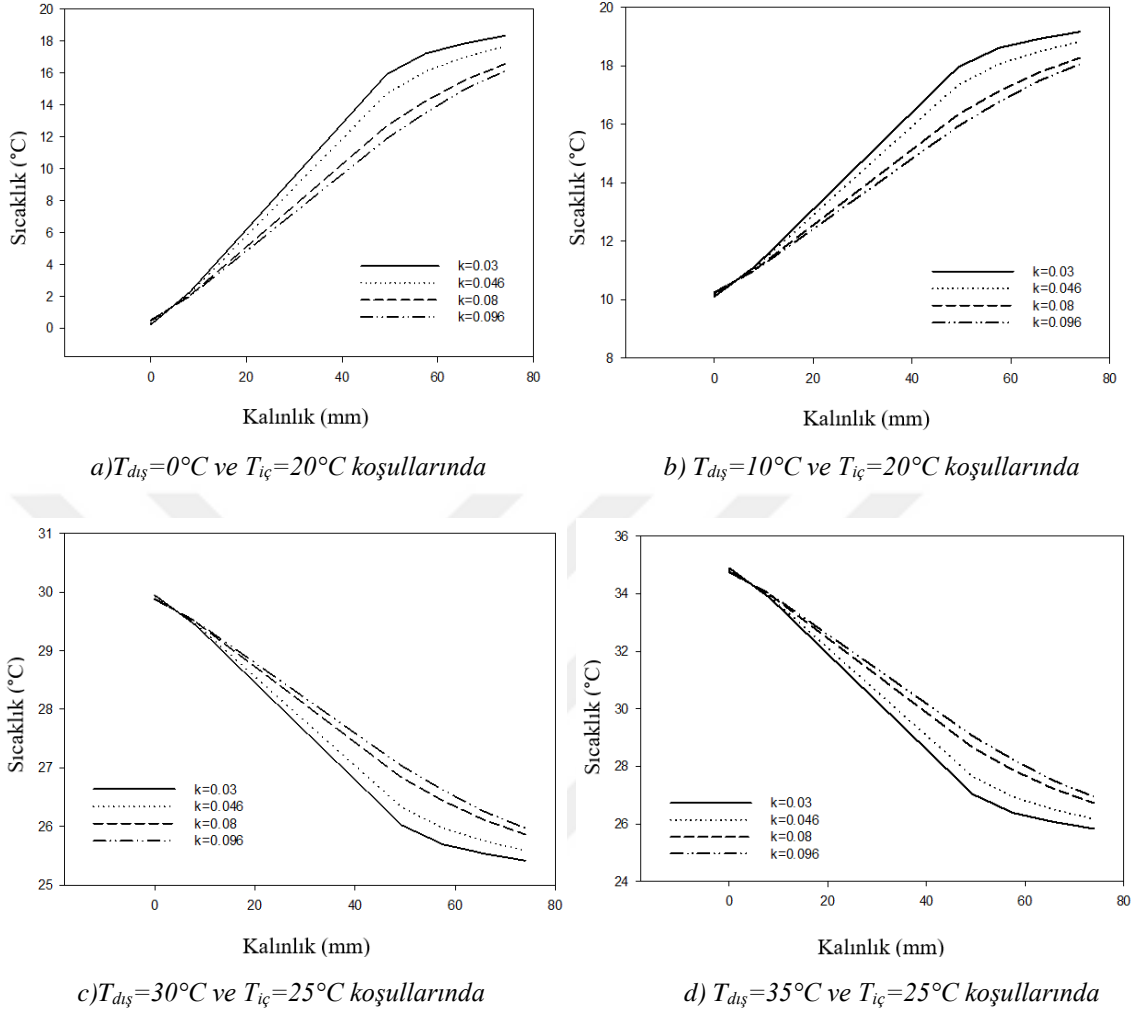
Şekil 5.5. Yan duvarların yaz ve kış koşullarında ısı iletim katsayısı $0,046 \text{ W/mK}$ olan yalıtım malzemesi için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçları



Şekil 5.6. Yan duvarların yaz ve kış koşullarında ısı iletim katsayısı $0,096 \text{ W/mK}$ olan yalıtım malzemesi için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçları

Diğer bir karşılaştırma Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Bu şekil grubunda, $k = 0,096 \text{ W/mK}$ için, bir kış bir de yaz koşulu için grafikler gösterilmiştir. Dört farklı kalınlığın ısı iletim katsayısı $0,096 \text{ W/mK}$ olan malzeme üzerindeki etkisinin incelendiği grafiklerde, $t=50 \text{ mm}$ 'ye ait düz çizginin kış ortamı senaryosunda kalan kalınlığın açıkça gerisinde, yaz ortamı senaryosunda ise önde olduğu gözlenmektedir. Benzer değişim trendleri gözlenmek ile birlikte, yine 50 mm kalınlığın eşik değer olduğu görülmekte ve bunun üzerindeki kalınlıklarda çakışan sıcaklık değişim eğrileri tespit edilmektedir.

5.2. Taban Analiz Sonuçları



Şekil 5.7. 50 mm yalıtım kalınlığındaki tabanın yaz ve kış koşullarındaki analiz sonuçları

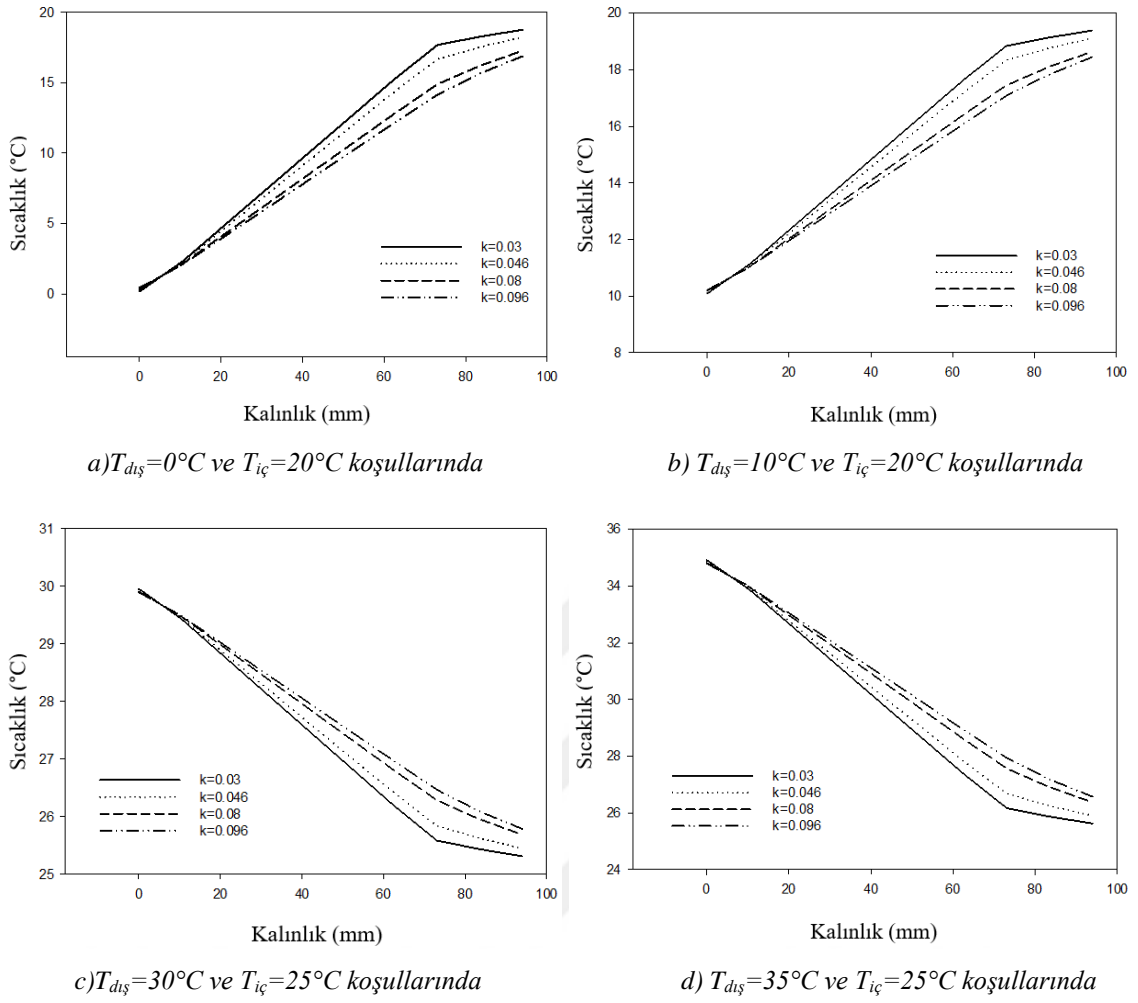
Vagon geometrisinin bir diğer parçası olan taban duvarının 50 mm yalıtım malzemesi kalınlığı için dört farklı yalıtım malzemesine göre karşılaştırması Şekil 5.7’de verilmiştir. Taban duvarını diğer duvarlardan ayıran bir özellik iç kısımda kullanılan ve maruz kaldığı yükleri eşit olarak karkas yapıya ileten 18 mm kalınlığındaki tahtadır.

Zemini rijitleştirerek yolcu konforunu arttıran zemin tahtası buna ek olarak şekilde de görüldüğü üzere ısı iletiminde de fayda sağlamaktadır. Yan duvarlarda olduğu gibi taban duvarında da beklenildiği üzere iletkenlik arttıkça iç ortam sıcaklığının istenilen sıcaklıktan uzaklaştığı görülmektedir. Taban duvarında zemin tahtasının etkisi şekilde gösterildiği üzere 50 mm’den sonra net olarak görülmektedir. Tahtanın başlangıcı ile lineer azalış eğrisindeki değişiklik yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısına göre

farklılaşmaktadır. Aynı parametrelerde yan duvar ile karşılaştırıldığında kabin içi sıcaklığın talep edilen sıcaklığa daha fazla yaklaştığı söylenebilmektedir. Tahtanın etkisi ısı iletim katsayısı düşük olan malzemede daha net görülürken ısı iletim katsayısı arttıkça etkinin incelenmesi zorlaşmaktadır.

Yan duvarların analiz sonuçları ile karşılaştırıldığında farklı malzemelerin 50 mm kalınlıkta aralarında gözle görülür bir fark oluşmaktadır. Isı iletim katsayısı düşük olan yani iyi yalıtkan olarak adlandırılan malzeme kabin içi sıcaklığın talep edilen sıcaklığa en yakın olduğu 26° C ye ulaşmaktadır. Isı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan iyi iletken olarak tanımlanan malzeme ise 28° C ye yaklaşmaktadır.

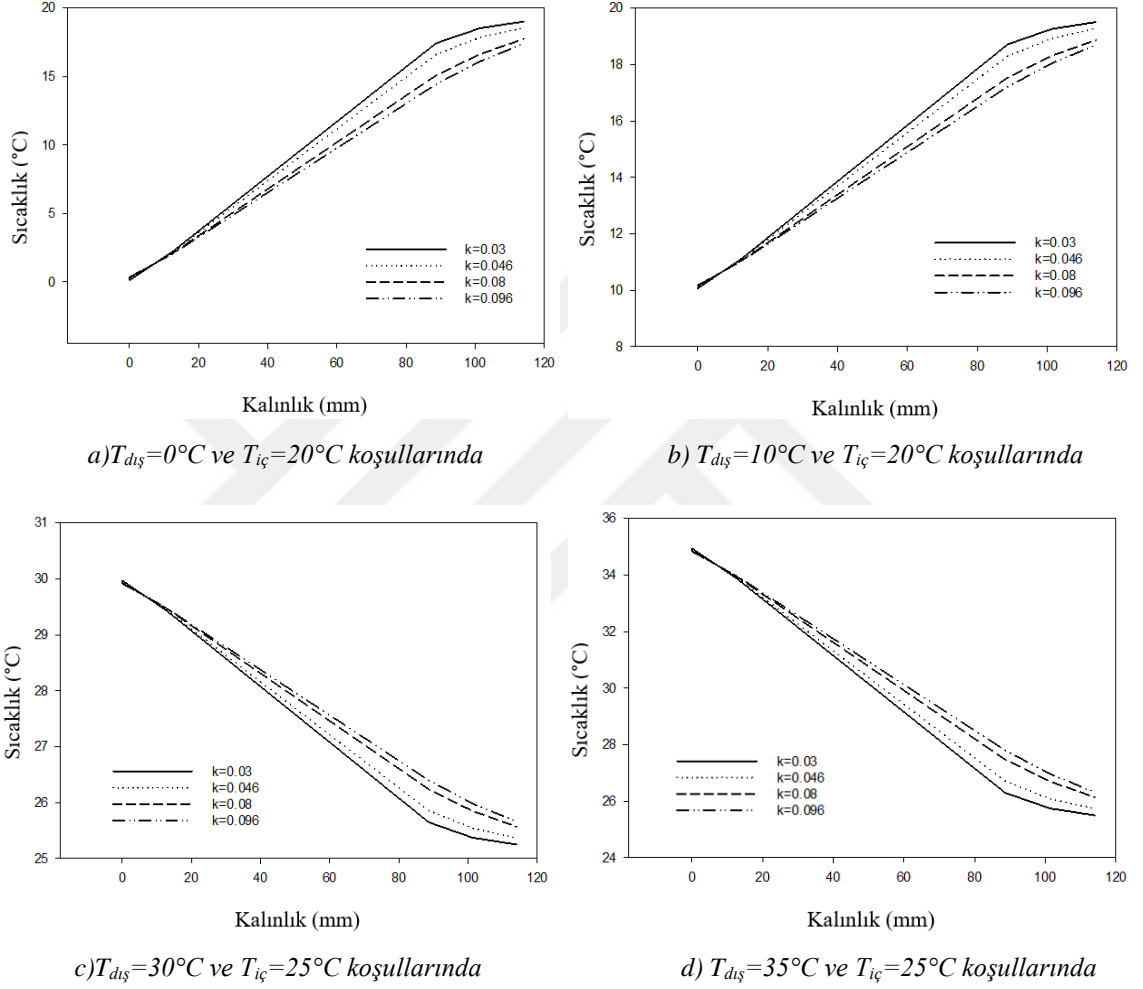
70 mm kalınlığında yalıtım malzemesi kullanılan ve parametrik olarak dört farklı yalıtım malzemesi ile analiz edilen taban duvarının karşılaştırması Şekil 5.8’de verilmiştir. 50 mm kalınlığında yalıtım malzemesi kullanılan taban duvarı ile karşılaştırıldığında eğriler birbirine benzemektedir. Tahtanın başlaması ile ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzeme eğrisinin 50 mm’de aynı parametrelerdeki eğriye göre daha keskin bir yol izlediği görülmektedir. Bunun sebebi yalıtım malzemesinin kalınlığının artmasıdır. 50 mm yalıtım malzemesi 26 °C’nin üstünde bir sıcaklığı tahtaya iletirken, 70 mm yalıtım malzemesi 26 °C nin altında iletmektedir. Bu fark ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK ve 0,046 W/mK olan yalıtım malzemelerinde görülmektedir. Yalıtım malzemesi kalınlığı arttırıldığında kış koşullarında talep edilen sıcaklığın altında, yaz koşullarında talep edilen sıcaklığın üstünde kalan sıcaklıklar 50mm e göre talep edilen sıcaklığa daha fazla yaklaşmaktadır. Mevcut durumda kullanılan malzemelerden ısı iletim katsayısı düşük olan iyi yalıtkan malzeme talep edilen iç hava sıcaklığına en yakın malzeme olarak görülmektedir. İyi iletken olan 0,096 W/mK ısı iletim katsayısına sahip malzeme ısının iletimini hızlandırarak istenilen sıcaklık değerinden uzaklaştırmaktadır.



Şekil 5.8. 70 mm yalıtım kalınlığındaki tabanın yaz ve kış koşullarındaki analiz sonuçları

70 mm kalınlığında yalıtım malzemesi kullanılan ve parametrik olarak dört farklı yalıtım malzemesi ile analiz edilen taban duvarının karşılaştırması Şekil 5.8’de verilmiştir. 50 mm kalınlığında yalıtım malzemesi kullanılan taban duvarı ile karşılaştırıldığında eğriler birbirine benzemektedir. Tahtanın başlaması ile ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzeme eğrisinin 50 mm’de aynı parametrelerdeki eğriye göre daha keskin bir yol izlediği görülmektedir. Bunun sebebi yalıtım malzemesinin kalınlığının artmasıdır. 50 mm yalıtım malzemesi 26 °C’nin üstünde bir sıcaklığı tahtaya iletirken, 70 mm yalıtım malzemesi 26 °C nin altında iletmektedir. Bu fark ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK ve 0,046 W/mK olan yalıtım malzemelerinde görülmektedir. Yalıtım malzemesi kalınlığı arttırıldığında kış koşullarında talep edilen sıcaklığın altında, yaz koşullarında talep edilen sıcaklığın üstünde kalan sıcaklıklar 50 mm’e göre talep edilen sıcaklığa daha fazla yaklaşmaktadır. Mevcut durumda kullanılan malzemelerden

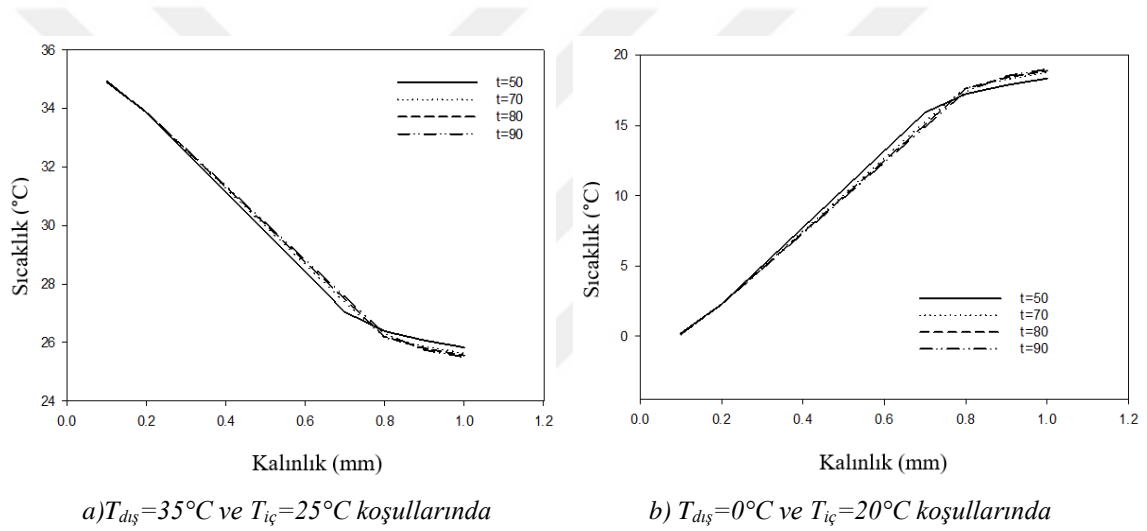
ısı iletim katsayısı düşük olan iyi yalıtkan malzeme talep edilen iç hava sıcaklığına en yakın malzeme olarak görülmektedir. İyi iletken olan 0,096 W/mK ısı iletim katsayısına sahip malzeme ısının iletimini hızlandırarak istenilen sıcaklık değerinden uzaklaştırmaktadır.



Şekil 5.9. 90 mm yalıtım kalınlığındaki tabanın yaz ve kış koşullarındaki analiz sonuçları

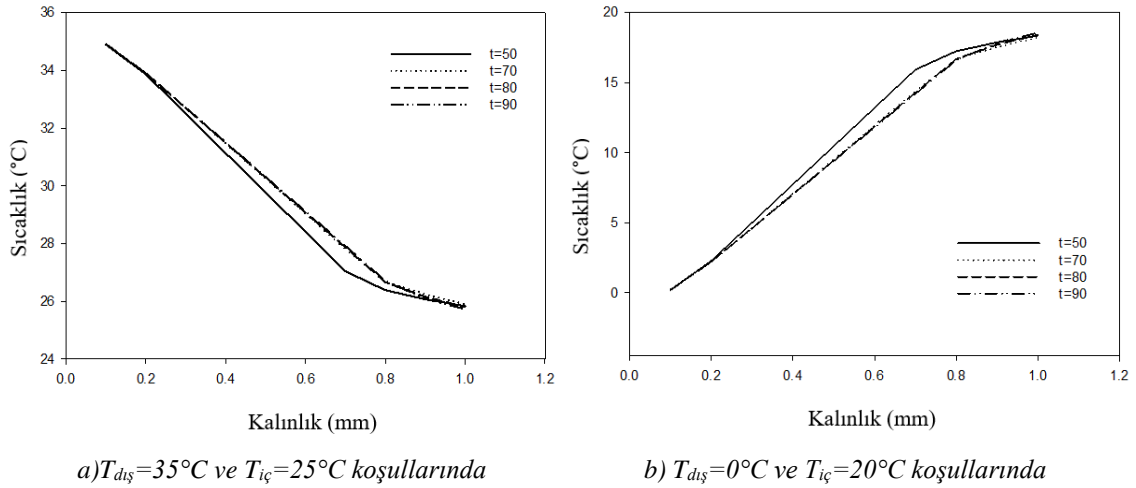
90 mm kalınlığında yalıtım malzemesi kullanılan ve parametrik olarak dört farklı yalıtım malzemesi ile analiz edilen taban duvarının karşılaştırması Şekil 5.9'da verilmiştir. 50 mm ve 70 mm kalınlığında yalıtım malzemesi kullanılan taban duvarı analizleri ile karşılaştırıldığında eğriler birbirine benzemekte olup, ısı iletim katsayısı arttıkça eğrilerde artmaktadır. Farklı kalınlıklarda eğrilerin birbirine benzemesine ek olarak sıcaklık değerlerinde belirgin bir fark görülmemektedir. Diğer kalınlıklarla karşılaştırıldığında iyi iletken ve iyi yalıtkan olarak tanımlanan malzemelerin aralarındaki

fark kalınlığının artması ile azalmaktadır. Keskin geçişlere sahip eğrilerin 90 mm kalınlıkta normalleştiği gözlemlenmiştir. Isı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzemenin 26 °C’de neredeyse sabit kaldığı, 0,096 W/mK olan malzemenin ise 27 °C’ye indiği görülmektedir. Bu durum talep edilen sıcaklığa yaklaştıkça ısı iletim katsayısının etkisinin azalması olarak değerlendirilebilir. Kalınlığın ısı iletimine olan etkisi analiz parametrelerinde kabul edilen kalınlıklarda incelendiğinde yok sayılacak kadar az olduğu görülmüştür. Kalınlığın etkisinin daha detaylı incelenmesi için ısı iletim katsayısı sabit tutularak karşılaştırma grafikleri oluşturulmuştur. Kalınlıklar farklı olduğu için bu çalışmada normalizasyon çalışması yapılmıştır.



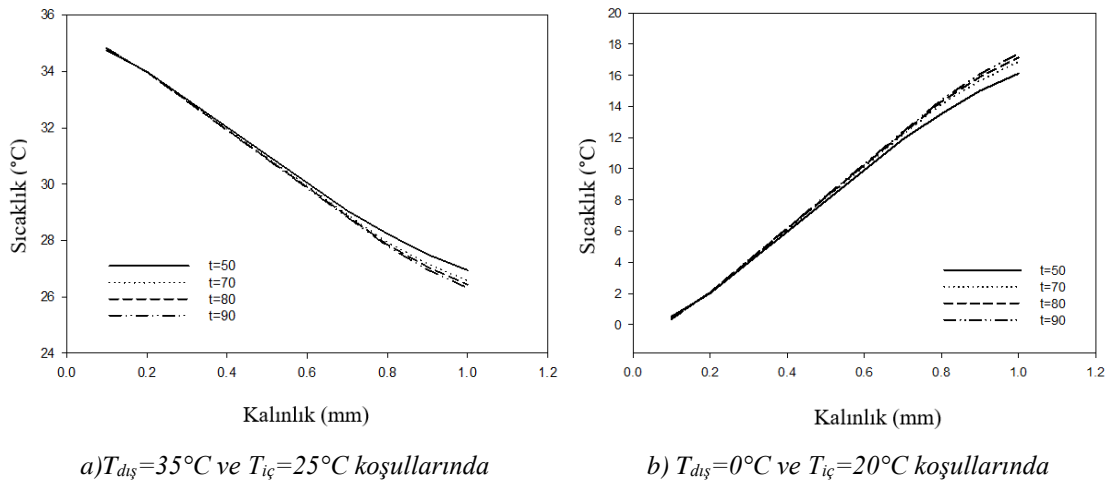
Şekil 5.10. Tabanın yaz ve kış koşullarında ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan yalıtım malzemesi için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçları

Şekil 5.10’da taban duvarının yaz ve kış koşullarında ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan yalıtım malzemeleri için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçlarını içermektedir. Şekilde görülen grafik 0,03 W/mK ısı iletim katsayılı malzeme için kalınlığın etkisinin 50 mm yalıtım malzemesi kalınlığından sonra gözle görülür bir değişikliğe ulaştığını göstermektedir. Farklı kalınlıklara sahip modellerin tek bir grafikte karşılaştırılabilmesi için normalizasyon yapılmış ve aynı grafik üzerinde bu şekilde sunulabilmiştir. Bu durum grafiklerde eğrileri farklı gibi gösterse bile başlangıç ve bitiş sıcaklıklarında fark gözlemlenmemektedir. Bu malzemeler için 50 mm kalınlık sınır değer olarak değerlendirilmelidir.



Şekil 5.11. Tabanın yaz ve kış koşullarında ısı iletim katsayısı 0,046 W/mK olan yalıtım malzemesi için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçları

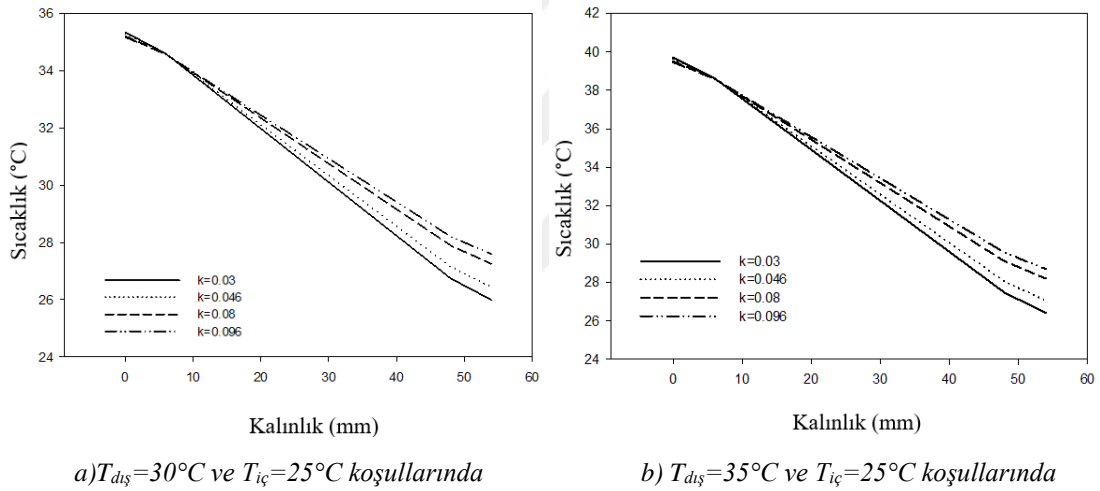
Şekil 5.11’de taban duvarının yaz ve kış koşullarında ısı iletim katsayısı 0,046 W/mK olan yalıtım malzemeleri için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçlarını içermektedir. 50 mm’de olduğu gibi bu kalınlıkta da fark başlangıç ve bitiş arasında kayda değer bir fark görülmemiştir. Farklı kalınlıkların tek grafikte karşılaştırılabilmesi için gerekli olan normalizasyon çalışmasından kaynaklı eğrilerdeki görsel farklar dikkate alınmamıştır.



Şekil 5.12. Tabanın yaz ve kış koşullarında ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan yalıtım malzemesi için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçları

Şekil 5.12’de taban duvarının yaz ve kış koşullarında ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan yalıtım malzemeleri için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçlarını içermektedir. Şekilde ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan malzeme için kalınlığın etkisinin 50 mm yalıtım malzemesi kalınlığından sonra gözle görülür bir değişikliğe ulaştığını göstermektedir. Diğer kalınlıklarda benzer olan başlangıç ve bitiş sıcaklıkları 90 mm kalınlıktan sonra değişme eğilimi göstermektedir. Kalınlıkla birlikte değişim görülen malzemenin 0,03 W/mK yani iyi yalıtkan malzeme olmasının etkisi de göz ardı edilmemelidir. Farklı kalınlıklara sahip modellerin tek bir grafikte karşılaştırılabilmesi için normalizasyon yapılmış ve aynı grafik üzerinde bu şekilde sunulabilmektedir.

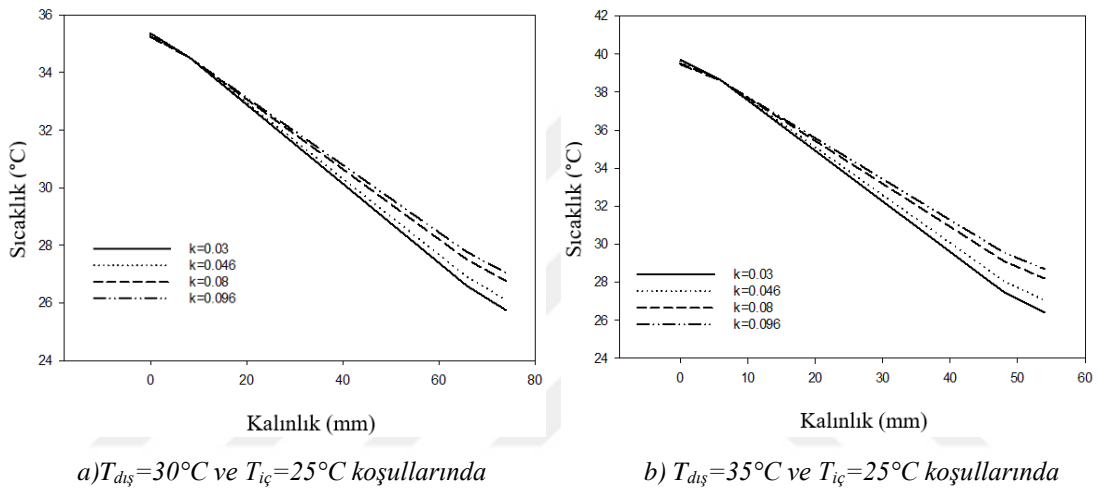
5.3. Tavan Analiz Sonuçları



Şekil 5.13. 50 mm yalıtım kalınlığındaki tavanın yaz koşullarındaki analiz sonuçları

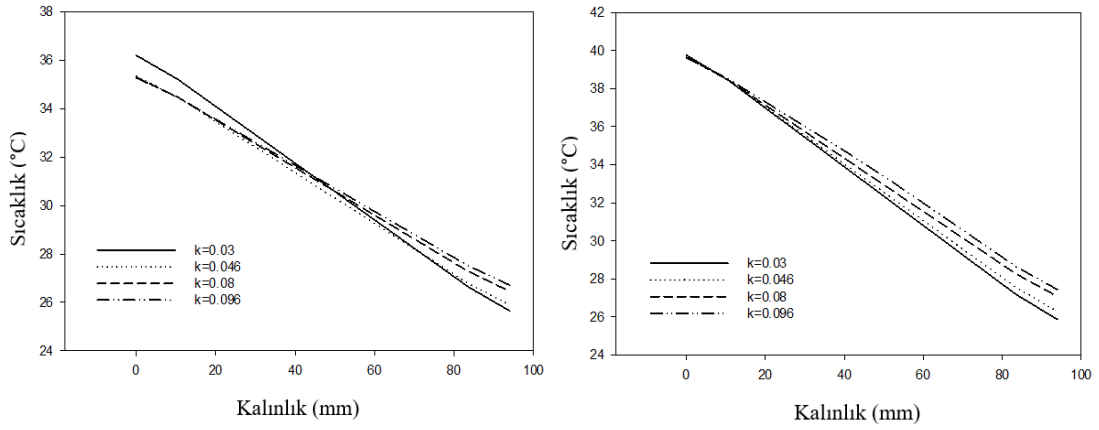
Vagon geometrisinin bir diğer parçası olan tavan duvarının 50 mm yalıtım malzemesi kalınlığı için dört farklı yalıtım malzemesine göre yaz koşullarında karşılaştırması Şekil 5.13’te verilmiştir. Radyasyon yaz ve kış koşullarında kabin içinde sıcaklığı arttırmaktadır. Bu durum kış koşullarında olumlu, yaz koşullarında olumsuz bir etki oluşturmaktadır. Bu sebeple tavan duvarının yalnızca yaz koşullarında incelenmiştir. Diğer duvarlardan farklı olarak tavan duvarı analiz parametrelerine radyasyon etkisi eklenmiştir. Grafikler incelendiğinde tavan duvarında iç ve dış duvarların yan ve taban duvarından daha yüksek sıcaklıklara ulaştığı görülmektedir. Bu durum kabin içi sıcaklığın yaz koşullarında olması gereken 25 °C’nin üzerine çıkartmaktadır.

Beklenildiği üzere ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK'ne sahip malzeme, iç ortamın istenilen sıcaklığa daha yakın bir değerde tutulmasını diğer malzemelerden daha iyi sağlamaktadır. Isı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzeme 26 °C'ye yaklaşmakta ancak 0,096 W/mK olan malzeme 28 °C'nin üzerinde kalmaktadır. Farklı malzeme kullanımından kaynaklanan sıcaklık farkı 2 °C'nin üzerine çıkmaktadır. Radyasyon etkisi ile değerlendirildiğinde farklı ısı iletim katsayısına sahip malzemelerin iletme olan etkisi tavan geometrisi incelendiğinde daha net olarak görülebilmektedir.



Şekil 5.14. 70 mm yalıtım kalınlığındaki tavanın yaz koşullarındaki analiz sonuçları

Tavan duvarı için diğer bir yalıtım malzemesi kalınlığı olan 70 mm için analiz sonuçları Şekil 14'te verilmiştir. Yalıtım malzemesi kalınlığının 50 mm'den 70 mm çıkarılması kabin içi sıcaklığın korunma miktarını arttırmıştır. Grafiklerde görüldüğü şekilde sıcaklık dış kabuktan iç kabuğa doğru düşmektedir. Bu düşme eğilimlerinde, ısı iletim katsayısı düşük olan ısıyı daha kötü iletmektedir. Bununla birlikte yaz koşullarında kabin içerisini daha soğuk tutmaktadır. Isı iletim katsayısı $k=0,03$ W/mK olan yani en iyi yalıtkan malzeme enerji iletimini yavaşlattığı için, bölgeler arası sıcaklık farkı diğer iletken malzemelere göre daha fazladır. Isı iletim katsayısı $k=0,096$ W/mK olan yani iyi iletken malzeme için ortam sıcaklıklarının 30 °C ve 35 °C olduğu durumlarda kabin içi sıcaklığın daha yüksek olmasına yol açmaktadır. Diğer iki malzeme ($k=0,046$ W/mK ve $k=0,08$ W/mK) arasında iletkenlik değerleri yüksekten düşüğe doğru sıralanmıştır. Kalınlığın artmasının farklı ısı iletim katsayısına sahip malzemelerin aralarındaki farkı azaltan bir etki oluşturduğu gözlemlenmiştir.

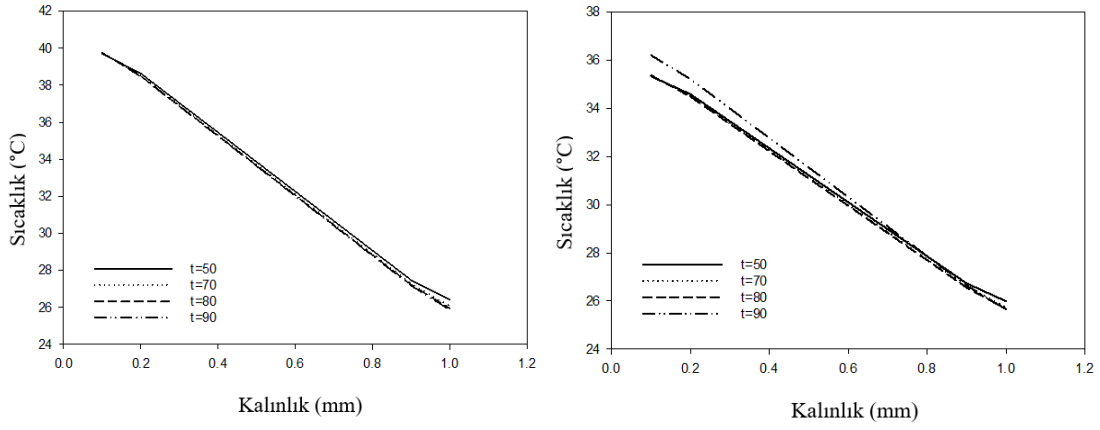


a) $T_{dış}=30^{\circ}C$ ve $T_{iç}=25^{\circ}C$ koşullarında

b) $T_{dış}=35^{\circ}C$ ve $T_{iç}=25^{\circ}C$ koşullarında

Şekil 5.15. 90 mm yalıtım kalınlığındaki tavanın yaz koşullarındaki analiz sonuçları

Tavan duvarı için diğer bir yalıtım malzemesi kalınlığı olan 90 mm için analiz sonuçları Şekil 5.15'te verilmiştir. Yan ve taban duvarlarında olduğu gibi ısı iletim katsayısının iç sıcaklığın korunmasındaki önemi grafiklerden anlaşılmaktadır. Daha önceki bulgularda olduğu gibi ısı iletim katsayısı $k = 0,03$ W/mK olan iyi yalıtkan malzeme, iç ortam sıcaklığını hedef sıcaklığa yakın tutma konusunda $k = 0,096$ W/mK olan malzemedan daha iyi performans göstermektedir. Isıyı daha iyi ileten ve yaz simülasyonlarında kabin içinde daha sıcak bir ortam oluşmasına neden olan malzeme 0,096 W/mK ısı iletim katsayısına sahiptir. Isı iletim katsayıları kademeli olarak 0,03 W/mK'den 0,096 W/mK'e yükseldikçe, eğriler de kademeli olarak yükselmektedir. Grafikler benzer bir eğilimde olsalar da eğriler arasında gözle görülür bir ayrım vardır. Önemli olan bir diğer nokta, kalınlığın etkisidir. Benzer şekilde kalınlığın etkisini inceleyebilmek için ısı iletim katsayısı sabit tutularak kalınlığın etkisinin incelenebileceği grafikler oluşturulmuştur. Farklı kalınlıklara sahip modellerin tek bir grafikte karşılaştırılabilmesi için normalizasyon yapılmış ve aynı grafik üzerinde bu şekilde sunulabilmektedir.

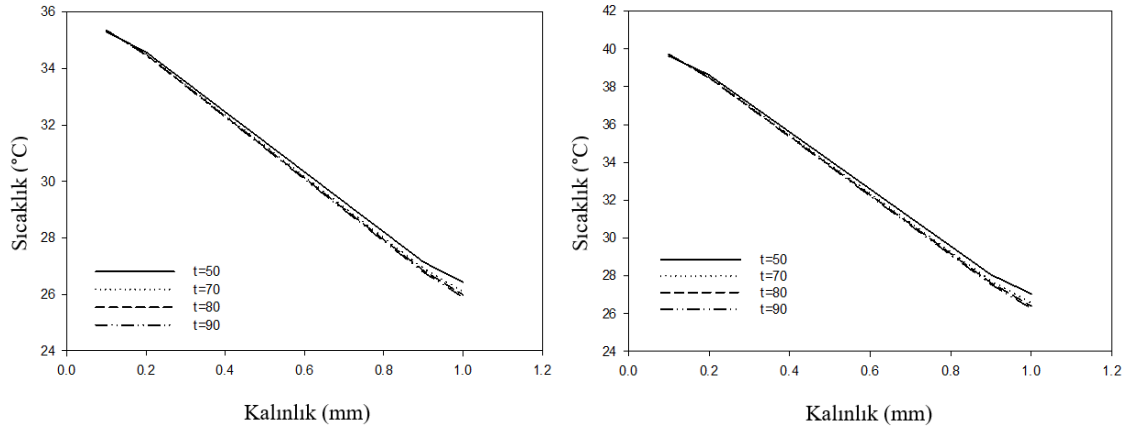


a) $T_{dış}=35^{\circ}C$ ve $T_{iç}=25^{\circ}C$ koşullarında

b) $T_{dış}=30^{\circ}C$ ve $T_{iç}=25^{\circ}C$ koşullarında

Şekil 5.16. Tavanın yaz koşullarında ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan yalıtım malzemesi için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçları

Isı iletim katsayıları sabit tutularak malzeme kalınlığının ısı iletimine olan etkisi Şekil 5.16’da 0,03 W/mK yalıtım malzemesi için gösterilmiştir. Farklı kalınlıklara sahip modellerin tek bir grafikte karşılaştırılabilmesi için normalizasyon yapılmış ve aynı grafik üzerinde bu şekilde sunulabilmiştir. Şekil 5.16’daki grafiklerle ilgili olarak aynı malzemenin değişen kalınlıkları arasında belli belirsiz bir fark vardır. İncelenen koşullar altında neredeyse aynı termal reaksiyonu göstermektedirler. Buna ek tek fark, en düşük kalınlık olan $t=50$ mm için kayıt edilmiştir. 0,03 W/mK ısı iletim katsayısına sahip bu malzemede kalınlık değişiminin önemli bir rol oynamadığını söylemek çok yanlış olmayacaktır. Ancak 50 mm kalınlığındaki yalıtım malzemesi bu iletkenlik değeri için sınır değer olarak not edilebilir.

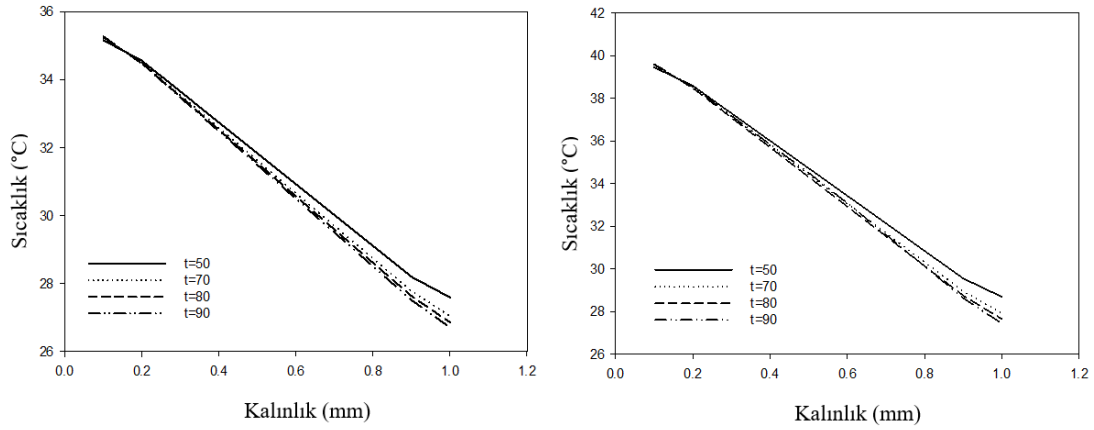


a) $T_{dış}=30^{\circ}C$ ve $T_{iç}=25^{\circ}C$ koşullarında

b) $T_{dış}=35^{\circ}C$ ve $T_{iç}=25^{\circ}C$ koşullarında

Şekil 5.17. Tavanın yaz koşullarında ısı iletim katsayısı 0,046 W/mK olan yalıtım malzemesi için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçları

Isı iletim katsayıları sabit tutularak malzeme kalınlığının ısı iletimine olan etkisi Şekil 5.17’de 0,046 W/mK yalıtım malzemesi için gösterilmiştir. Farklı kalınlıklara sahip modellerin tek bir grafikte karşılaştırılabilmesi için normalizasyon yapılmış ve aynı grafik üzerinde bu şekilde sunulabilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ısı iletim katsayısı $k = 0,03$ W/mK olan malzemede olduğu gibi, değişim eğrileri birbirine çok yakındır ve aralarında belli belirsiz bir fark görülmektedir. Yaz koşulları için grafikler incelendiğinde, 50 mm üzerindeki kalınlıklarda değişim eğrileri birbirine çok yakın iken, 50 mm eğrileri diğer malzemelerden farklı olarak gelişmektedir. Bu koşullarda da 50 mm üzerindeki kalınlıkların fark edilecek bir etki yaratmadığı gözlenmektedir.



a) $T_{dış}=30^{\circ}C$ ve $T_{iç}=25^{\circ}C$ koşullarında

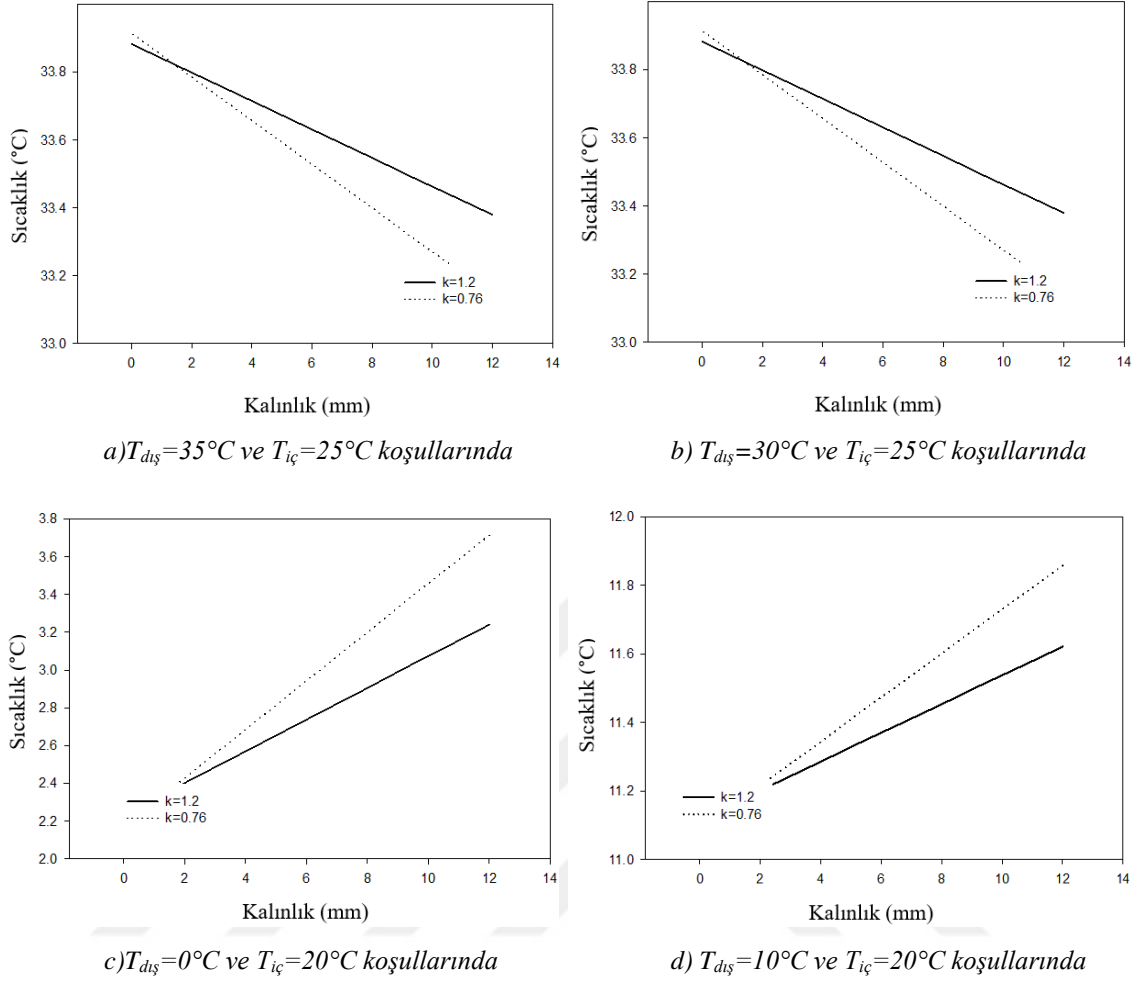
b) $T_{dış}=35^{\circ}C$ ve $T_{iç}=25^{\circ}C$ koşullarında

Şekil 5.18. Tavanın yaz koşullarında ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan yalıtım malzemesi için farklı kalınlıklardaki analiz sonuçları

Isı iletim katsayıları sabit tutularak malzeme kalınlığının ısı iletimine olan etkisi Şekil 5.18’de 0,096 W/mK yalıtım malzemesi için gösterilmiştir. Benzer şekilde 50 mm yalıtım malzemesi kalınlığı dışında diğer kalınlıklar için sonuçların neredeyse aynı olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum 50 mm yalıtım malzemesi kalınlığının altına inilmediği sürece kritik parametrenin ısı iletim katsayısı olduğunu göstermektedir.

5.4. Pencere Analiz Sonuçları

Konvansiyonel vagon gövdesinin belirtilen bölümleri için ısı transfer analizi yapıldıktan sonra, bir diğer ayrı ve önemli bölüm olan pencerelerdeki ısıl tepki bu bölümde grafiklerle özetlenmiştir.

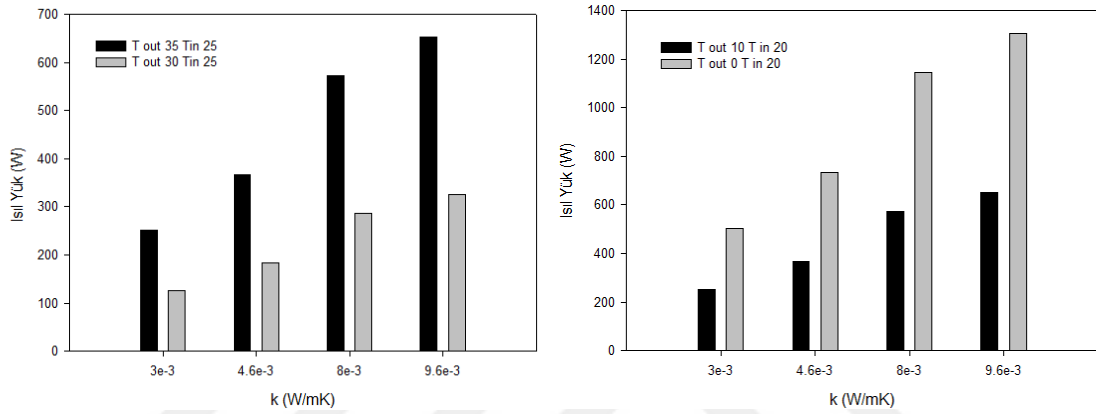


Şekil 5.19. Pencerenin yaz ve kış koşullarında farklı ısı iletim katsayıları için analiz sonuçları

Diğer bölümlerde olduğu gibi, pencere özelinde de ısı kayıplar yaz ve kış koşulları için ayrı ayrı incelenmiştir. Burada, farklı kalınlıktaki camdan ziyade, farklı ve alternatif olarak kullanılan iki malzeme dolayısı ile iki farklı ısı iletim katsayısı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.19’da özetlenmiştir. Kullanılan iki malzemeden birisinin iletim katsayısı 1,2 W/mK iken diğerinin ısı iletim katsayısı 0,76 W/mK’dir. Isı iletim katsayısı daha yüksek olan camın (1,2 W/mK), direncinin daha düşük olması sebebiyle, cam iç yüzeyini istenilen ortam sıcaklığından kışın daha düşük değerlerde tutabildiği, yazın ise daha yüksek değerlerde tutabildiği görülmektedir. Daha yalıtkan olan malzemenin de tersine, cam iç yüzeyini, yazın daha düşük yazın daha düşük sıcaklarda tutabildiği tespit edilmiştir. Ancak her iki durumda da cam iç yüzey sıcaklıklarının hedef iç ortam sıcaklıklarında çok uzak oldukları, hem yaz hem de kışın dış ortam sıcaklığından sadece 2-3 °C farklı bir iç yüzey sıcaklığına sahip oldukları gözlenmiştir.

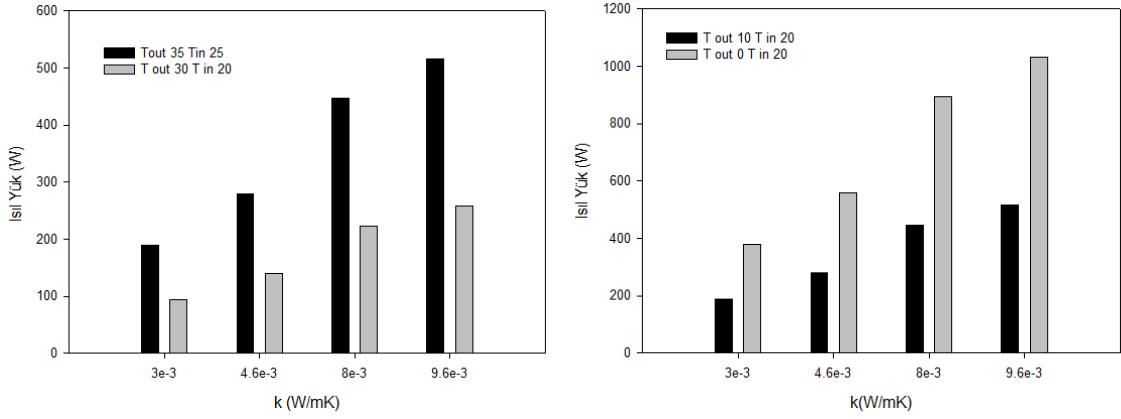
5.5. Isıl Yüklerin Değerlendirilmesi

İzolasyon için kullanılan malzemenin çeşidi ve kalınlığının, yalıtım üzerindeki etkisini daha iyi gözleyebilmek için, bir önceki bölümde elde edilen sıcaklık farkı grafiklerinden yola çıkılarak, vagonların toplam ısı yüklerinin incelenen koşullar altındaki değerleri hesaplanmış ve bu bölümde yaz ve kış koşulları için ayrı ayrı grafiklerle özetlenmişlerdir.



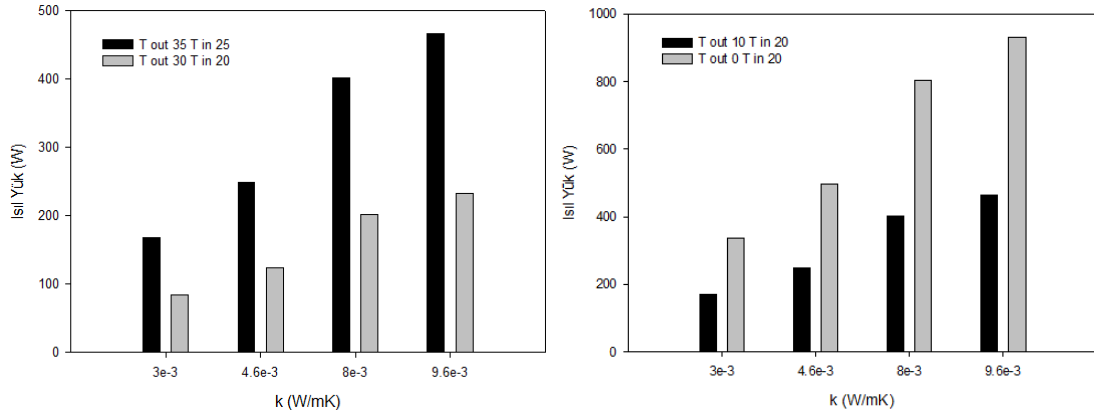
Şekil 5.20. Yan duvara ait yaz ve kış koşullarında $t=50$ mm kalınlıktaki ısı yükler

50 mm kalınlıktaki yan duvara ait yaz ve kış koşullarında ısı yükler Şekil 5.20’de verilmiştir. Yaz koşullarında ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan malzeme için dış ortam sıcaklığı 35 °C’de 600 Watt’lık bir ısı yük oluşmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 30 °C’ye düştüğünde yani iç ortam, dış ortam sıcaklığına yaklaştığında ısı yük 300 Watt’a düşmektedir. Aynı sıcaklıkta ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzemenin kullanıldığı durumlarda dış ortam sıcaklığı 35 °C ısı yük 250 Watt’a ulaşmaktadır. Dış ortam sıcaklığının 30 °C olduğu durumda ise ısı yük 100 Watt’a kadar düşmektedir. Kış koşullarında incelendiğinde dış ortam sıcaklığının 0 °C olduğu durumda 0,096 W/mK ısı iletim katsayısına sahip malzeme 1300 Watt değerinde ısı talep oluşturmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 10 °C’ye arttırıldığı durumda ise ısı talep 600 Watt’a düşmektedir. Isı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzemedde ise 0 °C 500 Watt’lık ısı talep oluşurken, dış ortam sıcaklığının 10 °C olduğu durumda 200 Watt’a düşmektedir.



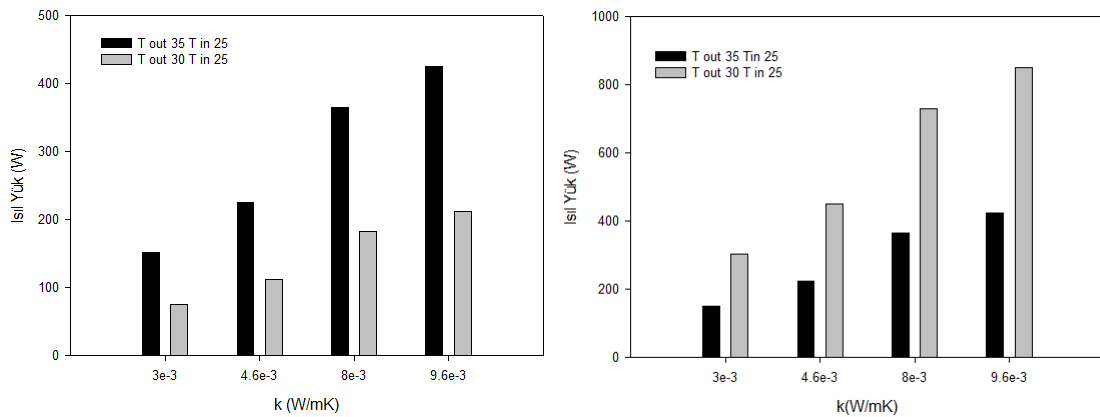
Şekil 5.21. Yan duvara ait yaz ve kış koşullarında $t=70$ mm kalınlıktaki ısı yükleri

70 mm kalınlıktaki yan duvara ait yaz ve kış koşullarında ısı yükleri Şekil 5.21’de verilmiştir. Yaz koşullarında ısı iletim katsayısı $0,096$ W/mK olan malzeme için dış ortam sıcaklığı 35 °C’de 500 Watt’lık bir ısı yükü oluşmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 30 °C’ye düştüğünde yani iç ortam ortam sıcaklığına yaklaştığında ısı yükü 250 Watt’a düşmektedir. Aynı sıcaklıkta ısı iletim katsayısı $0,03$ W/mK olan malzemenin kullanıldığı durumlarda dış ortam sıcaklığı 35 °C’de ısı yükü 200 Watt’a ulaşmaktadır. Dış ortam sıcaklığının 30 °C olduğu durumda ise ısı yükü 100 Watt’ın altına düşmektedir. Kış koşullarında incelendiğinde dış ortam sıcaklığının 0 °C olduğu durumda $0,096$ W/mK ısı iletim katsayısına sahip malzeme 1100 Watt değerinde ısı talep oluşturmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 10 °C’ye arttırıldığı durumda ısı talep 500 Watt’a düşmektedir. Isı iletim katsayısı $0,03$ W/mK olan malzemede ise 0 °C’de 400 Watt’lık ısı talep oluşurken, dış ortam sıcaklığının 10 °C’e olduğu durumda 200 Watt’a düşmektedir.



Şekil 5.22. Yan duvara ait yaz ve kış koşullarında $t=80$ mm kalınlıktaki ısı yükleri

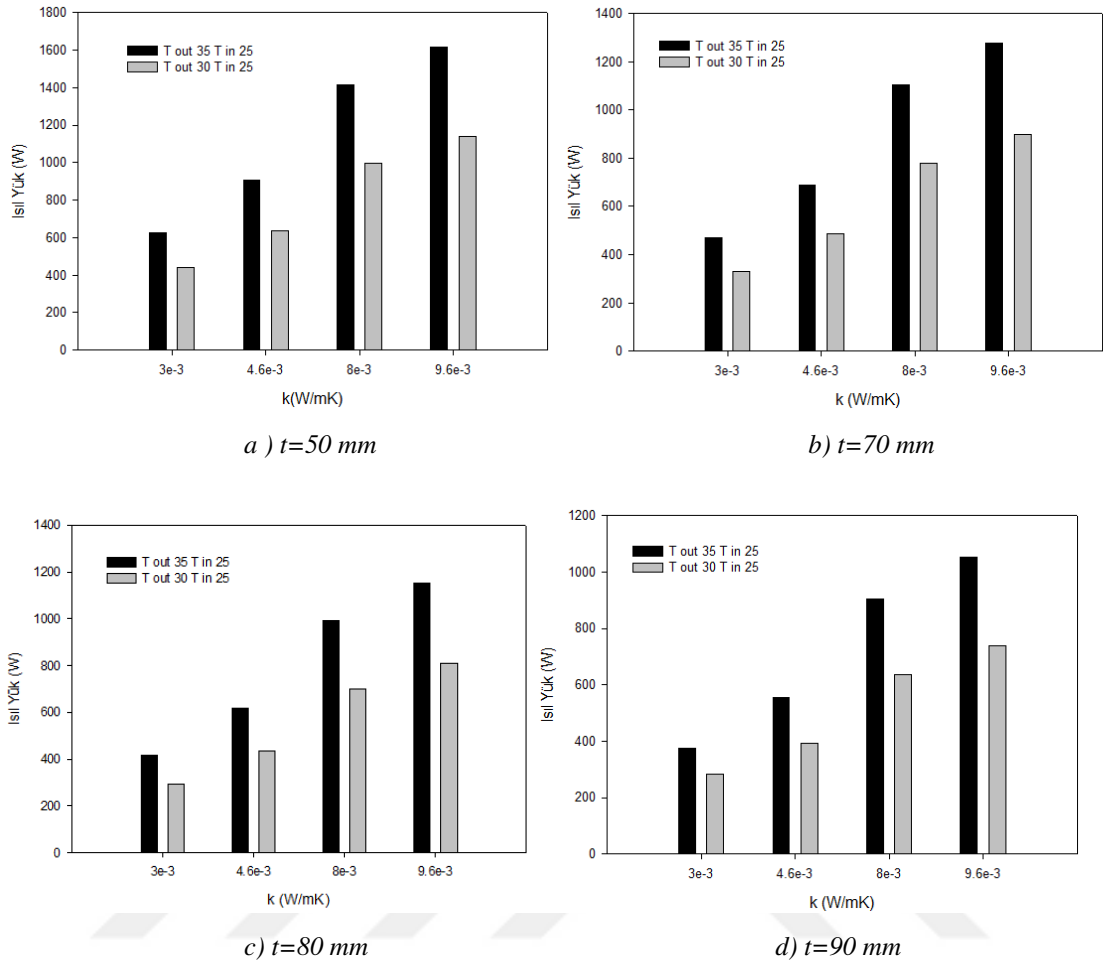
80 mm kalınlıktaki yan duvara ait yaz ve kış koşullarında ısı yükleri Şekil 5.22’de verilmiştir. Yaz koşullarında ısı iletim katsayısı $0,096$ W/mK olan malzeme için dış ortam sıcaklığı 35 °C’de 450 Watt’lık bir ısı yükü oluşmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 30 °C’ye düştüğünde yani iç ortam ortam sıcaklığına yaklaştığında ısı yükü 220 Watt’a düşmektedir. Aynı sıcaklıkta ısı iletim katsayısı $0,03$ W/mK olan malzemenin kullanıldığı durumlarda dış ortam sıcaklığı 35 °C’de ısı yükü 180 Watt’a ulaşmaktadır. Dış ortam sıcaklığının 30 °C olduğu durumda ise ısı yükü 80 Watt’ın altına düşmektedir. Kış koşullarında incelendiğinde dış ortam sıcaklığının 0 °C olduğu durumda $0,096$ W/mK ısı iletim katsayısına sahip malzeme 900 Watt değerinde ısı talep oluşturmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 10 °C’ye arttırıldığı durumda ısı talep 450 Watt’a düşmektedir. Isı iletim katsayısı $0,03$ W/mK olan malzemede ise 0 °C’de 350 Watt’lık ısı talep oluşurken, dış ortam sıcaklığının 10 °C olduğu durumda 180 Watt’a düşmektedir.



Şekil 5.23. Yan duvara ait yaz ve kış koşullarında $t=90$ mm kalınlıktaki ısı yükleri

90 mm kalınlıktaki yan duvara ait yaz ve kış koşullarında ısıl yükler Şekil 5.23’de verilmiştir. Yaz koşullarında ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan malzeme için dış ortam sıcaklığı 35 °C’de 430 Watt’lık bir ısıl yük oluşmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 30 °C’ye düştüğünde yani iç ortam ortam sıcaklığına yaklaştığında ısıl yük 200 Watt’a düşmektedir. Aynı sıcaklıkta ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzemenin kullanıldığı durumlarda dış ortam sıcaklığı 35 °C’de ısıl yük 150 Watt’a ulaşmaktadır. Dış ortam sıcaklığının 30 °C olduğu durumda ise ısıl yük 70 Watt’ın altına düşmektedir. Kış koşullarında incelendiğinde dış ortam sıcaklığının 0 °C olduğu durumda 0,096 W/mK ısı iletim katsayısına sahip malzeme 850 Watt değerinde ısıl talep oluşturmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 10 °C’ye arttırıldığı durumda ısıl talep 400 Watt’a düşmektedir. Isı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzemede ise 0 °C’de 300 Watt’lık ısıl talep oluşurken, dış ortam sıcaklığının 10 °C olduğu durumda 150 Watt’a düşmektedir.

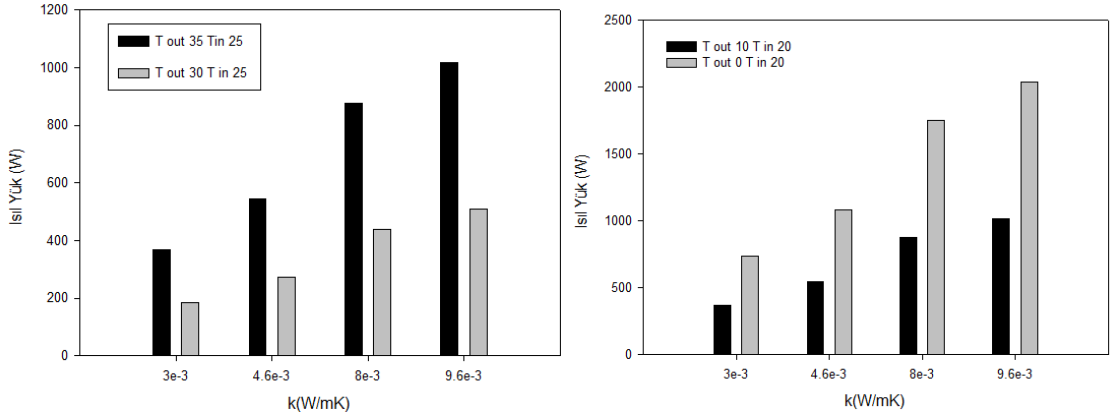
Yan duvarda kalınlık arttırıldığında yaz koşullarında dış ortam sıcaklığı 35 °C iken 0,03 W/mK ısı iletim katsayısına sahip malzeme için ısıl yük 100 Watt azalırken, 0,096 W/mK ısı iletim katsayısına sahip malzemede 200 Watt azalma görölmektedir. Dış ortam sıcaklığı 30 °C’ye indirildiğinde ısıl yük farkı daha aza olmaktadır. Kış koşullarında kullanılan yalıtım malzemesinin kalınlığı arttırıldığında 0,096 W/mK ısı iletim katsayısına sahip malzemede ısıl talep 500 Watt azalmaktadır. 0,03 W/mK ısı iletim katsayısına sahip malzemede ise ısıl talebin 200 Watt azaldığı görölmektedir.



Şekil 5.24. Tavana ait yaz koşullarında farklı kalınlıktaki ısı yükler

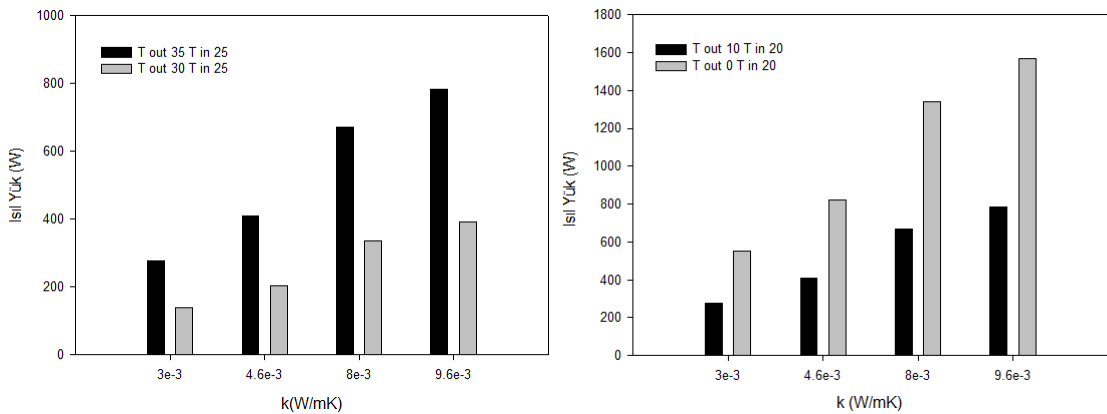
Farklı kalınlıklarda tavana ait yaz koşullarında ısı yükler Şekil 5.24’de verilmiştir. Analize dahil edilen radyasyonun ısı yük olarak etkisi yan duvar sonuçları ile karşılaştırıldığında net bir şekilde görülmektedir. 50 mm yalıtım malzemesi kalınlığı için dış ortam sıcaklığı 35 °C iken ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan malzeme 1700 Watt ısı yük oluşturmaktadır. Aynı sıcaklıkta ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzeme 600 Watt ısı yük oluşturmaktadır. Dış ortam sıcaklığı azaldığında ısı yük, ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan malzeme için 400 Watt azalırken, ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK malzeme için 200 Watt azalmaktadır.

Tavan duvarında kullanılan yalıtım malzemesinin kalınlığının artırılması, ısı iletim katsayısı 0,096W/mK olan malzeme için 600 Watt, ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzemede 200 Watt azalmaya neden olmaktadır.



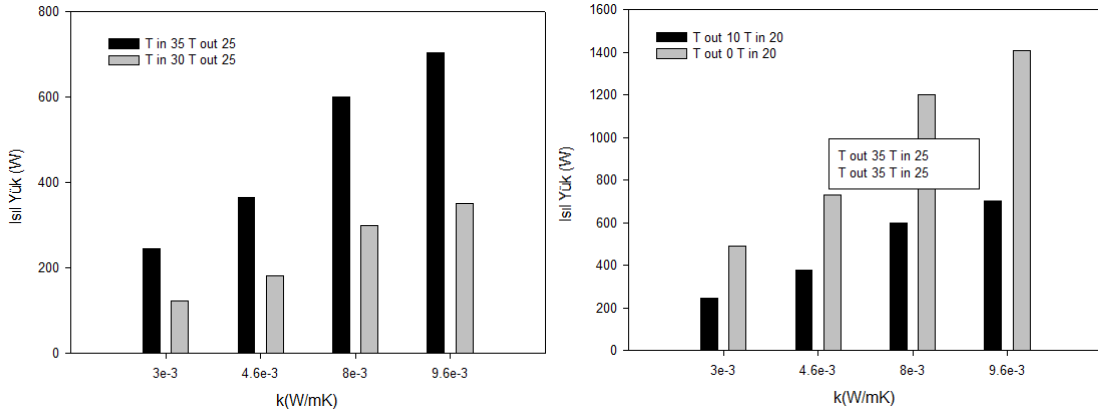
Şekil 5.25. Tabana ait yaz ve kış koşullarında $t=50$ mm kalınlıktaki ısı yükleri

50 mm kalınlıktaki taban duvarına ait yaz ve kış koşullarında ısı yükleri Şekil 5.25’de verilmiştir. Yaz koşullarında ısı iletim katsayısı $0,096$ W/mK olan malzeme için dış ortam sıcaklığı 35 °C’de 1000 Watt’lık bir ısı yükü oluşmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 30 °C’ye düştüğünde yani iç ortam ortam sıcaklığına yaklaştığında ısı yükü 500 Watt’a düşmektedir. Aynı sıcaklıkta ısı iletim katsayısı $0,03$ W/mK olan malzemenin kullanıldığı durumlarda dış ortam sıcaklığı 35 °C’de ısı yükü 400 Watt’a ulaşmaktadır. Dış ortam sıcaklığının 30 °C olduğu durumda ise ısı yükü 200 Watt’a kadar düşmektedir. Kış koşullarında incelendiğinde dış ortam sıcaklığının 0 °C olduğu durumda $0,096$ W/mK ısı iletim katsayısına sahip malzeme 2000 Watt değerinde ısı talep oluşturmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 10 °C’ye arttırıldığı durumda ısı talep 1000 Watt’a düşmektedir. Isı iletim katsayısı $0,03$ W/mK olan malzemede ise 0 °C’de 700 Watt’lık ısı talep oluşurken, dış ortam sıcaklığının 10 °C olduğu durumda 400 Watt’a düşmektedir.



Şekil 5.26. Tabana ait yaz ve kış koşullarında $t=70$ mm kalınlıktaki ısı yükleri

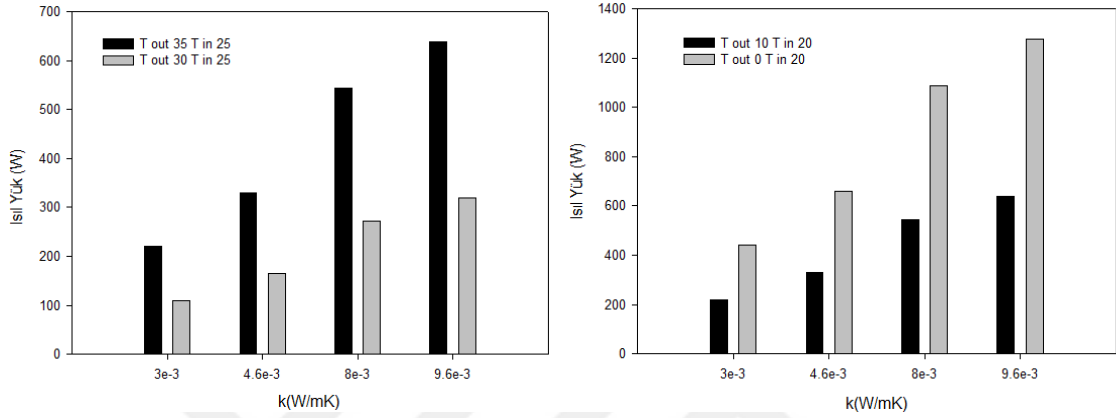
70 mm kalınlıktaki taban duvarına ait yaz ve kış koşullarında ısı yükler Şekil 5.26'da verilmiştir. Yaz koşullarında ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan malzeme için dış ortam sıcaklığı 35 °C'de 800 Watt'lık bir ısı yük oluşmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 30 °C'ye düştüğünde yani iç ortam ortam sıcaklığına yaklaştığında ısı yük 400 Watt'a düşmektedir. Aynı sıcaklıkta ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzemenin kullanıldığı durumlarda dış ortam sıcaklığı 35 °C'de ısı yük 300 Watt'a ulaşmaktadır. Dış ortam sıcaklığının 30 °C olduğu durumda ise ısı yük 100 Watt'a kadar düşmektedir. Kış koşullarında incelendiğinde dış ortam sıcaklığının 0 °C olduğu durumda 0,096 W/mK ısı iletim katsayısına sahip malzeme 1600 Watt değerinde ısı taleb oluşturmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 10 °C'ye artırıldığı durumda ısı talep 800 Watt'a düşmektedir. Isı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzemede ise 0 °C'de 600 Watt'lık ısı talep oluşurken, dış ortam sıcaklığının 10 °C olduğu durumda 300 Watt'a düşmektedir.



Şekil 5.27. Tabana ait yaz ve kış koşullarında $t=80$ mm kalınlıktaki ısı yükler

80 mm kalınlıktaki taban duvarına ait yaz ve kış koşullarında ısı yükler Şekil 5.27'de verilmiştir. Yaz koşullarında ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan malzeme için dış ortam sıcaklığı 35 °C'de 700 Watt'lık bir ısı yük oluşmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 30 °C'ye düştüğünde yani iç ortam ortam sıcaklığına yaklaştığında ısı yük 350 Watt'a düşmektedir. Aynı sıcaklıkta ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzemenin kullanıldığı durumlarda dış ortam sıcaklığı 35 °C'de ısı yük 250 Watt'a ulaşmaktadır. Dış ortam sıcaklığının 30 °C olduğu durumda ise ısı yük 90 Watt'a kadar düşmektedir. Kış koşullarında incelendiğinde dış ortam sıcaklığının 0 °C olduğu durumda 0,096 W/mK ısı

iletim katsayısına sahip malzeme 1400 Watt değerinde ısı taleb oluşturmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 10 °C'ye artırıldığı durumda ısı talep 700 Watt'a düşmektedir. Isı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzemede ise 0 °C'de 500 Watt'lık ısı talep oluşurken, dış ortam sıcaklığının 10 °C olduğu durumda 250 Watt'a düşmektedir.

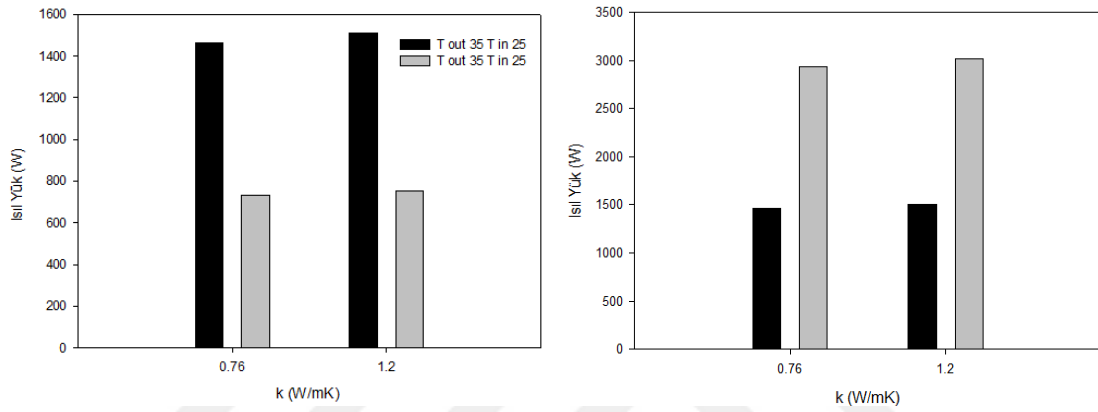


Şekil 5.28. Tabana ait yaz ve kış koşullarında t=90 mm kalınlıktaki ısı yükleri

90 mm kalınlıktaki taban duvarına ait yaz ve kış koşullarında ısı yükleri Şekil 5.28'de verilmiştir. Yaz koşullarında ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan malzeme için dış ortam sıcaklığı 35 °C'de 650 Watt'lık bir ısı yük oluşmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 30 °C'ye düştüğünde yani iç ortam ortam sıcaklığına yaklaştığında ısı yük 300 Watt'a düşmektedir. Aynı sıcaklıkta ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzemenin kullanıldığı durumlarda dış ortam sıcaklığı 35 °C'de ısı yük 200 Watt'a ulaşmaktadır. Dış ortam sıcaklığının 30 °C olduğu durumda ise ısı yük 80 Watt'a kadar düşmektedir. Kış koşullarında incelendiğinde dış ortam sıcaklığının 0 °C olduğu durumda 0,096 W/mK ısı iletim katsayısına sahip malzeme 1300 Watt değerinde ısı taleb oluşturmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 10 °C'ye artırıldığı durumda ısı talep 600 Watt'a düşmektedir. Isı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan malzemede ise 0 °C'de 400 Watt lık ısı talep oluşurken, dış ortam sıcaklığının 10 °C olduğu durumda 200 Watt'a düşmektedir.

Yan duvarlarda olduğu gibi taban duvarında benzer farklar görülmektedir. Zeminde kullanılan tahtanın etkisi, 50 mm kalınlık için yaz koşullarında ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan malzemede dış ortam sıcaklığı 35 °C için 400 Watt'lık ek ısı yük olarak görülmektedir. 0,03 W/mK ısı iletim katsayısına sahip malzeme için farkın 150 Watt

olduğu görülmüştür. Kış koşullarında ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan malzemede dış ortam sıcaklığı 0 °C için ısı talebi yan duvara göre 800 Watt artmaktadır. 0,03 W/mK malzeme için fark 200 Watt olarak oluşmaktadır. Dış ortam sıcaklığı istenilen iç ortam sıcaklığına yaklaştıkça yaz koşullarında ısı yükü, kış koşullarında ısı talebi azalmaktadır. Yan duvarlarda olduğu gibi taban zarfında yalıtım malzemesi kalınlığı artırıldığında yaz koşullarında ısı yükü, kış koşullarında ısı talebi azalmaktadır.



Şekil 5.29. Pencereye ait yaz ve kış koşullarında ısı yükleri

Yaz ve kış koşullarında 12 mm kalınlıkta farklı ısı iletim katsayılarına sahip camın ısı yüklerinin miktarı Şekil 5.29'da verilmiştir. 0,076 W/mK ve 1,2 W/mK ısı iletim katsayılarına sahip camların arasında farklı sıcaklıklarda en yüksek 100 Watt, en düşük 20 Watt fark gözlemlenmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Demiryolu araçlarında yolcu konfor şartlarını sağlayabilmek için tüketilen enerji miktarı, toplam tren enerji tüketiminin %30'unu oluşturmaktadır. Bu tüketimin azaltılabilmesi için birçok farklı çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde tren zarfının ısı kaybına olan etkisinin detaylı olarak araştırılmadığı görülmüştür.

Bu çalışmada tren zarfının detaylı incelenebilmesi için tren gövdesi dört farklı bölüme ayrılmıştır. Tavan, taban, yan duvar ve pencere olarak ayrılan bölümler 50 mm, 70mm, 80 mm ve 90 mm yalıtım kalınlıkları dikkate alınarak modellenmiştir. Isı kaybına etkisi olan diğer bir parametre ise ısı iletim katsayısıdır ve bu çalışmada 4 farklı malzeme için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Tasarlanan modeller dört farklı çevre koşulu için modellenmiş ve analizler bu koşullar gözetilerek tamamlanmıştır. İç ve dış ortam sıcaklıkları için yaz ve kış koşullarında dört farklı sıcaklık belirlenmiştir. Tavan geometrisinde iç ve dış ortam sıcaklıklarına ek olarak güneş yükü parametrelere dahil edilmiştir. Ticari bir yazılım olan ANSYS içerisindeki steady-state thermal modülü kullanılarak parametrik bir analiz yapılmıştır. Analizden elde edilen veriler değişkenlere göre karşılaştırılabilecek şekilde grafiklere dönüştürülmüştür.

Çalışma yolcu vagonu zarfında kullanılan yalıtım malzemesi çeşidinin ve kalınlığının enerji tüketimini kayda değer bir şekilde azalttığını göstermektedir. Isı iletim katsayısı azaldıkça yani seçilen malzeme yalıtkan bir malzeme olduğunda beklenildiği şekilde vagon zarfının iç ortam sıcaklığını istenilen sıcaklığa daha yakın bir değerde tutabildiği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde ısı iletim katsayısı arttığında vagon zarfında iletilen ısı miktarı artmakta ve iç ortam sıcaklığı istenilen değerden uzaklaşmaktadır. Zarf yapısında kullanılan malzemenin ve kalınlığın değiştirilmesi ile yolcuların konfor şartlarını değiştirmeden tüketilen enerji azaltılabilmektedir. Ayrıca aktif olarak kullanımı devam eden ısı iletim katsayısı yüksek vagonların revize edilebilirliği maliyet-fayda kapsamında değerlendirilebilir.

KAYNAKÇA

- Aliahmadi, A., Abdolzadeh, M., & Lari, K. (2017). Air flow simulation of HVAC system in compartment of a passenger coach. *Applied Thermal Engineering*, 973-990.
- Ampofo, F., Maidment, G., & Missenden, J. (2004). Underground railway environment in the UK Part 2: Investigation of heat load. *Applied Thermal Engineering* (24), 633–645.
- Amri, H., Hofstadter, R. N., & Kozek, M. (2011). Energy efficient design and simulation of a demand controlled heating and ventilation unit in a metro vehicle. *2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems*, 7-12.
- Bakanlığı, T. U. (2021). 12. Ulaştırma ve Haberleşme Şurası Sektör Raporları.
- Barone, G., Buonomano, A., Forzano, C., & Palombo, A. (2020). Enhancing trains envelope e heating, ventilation, and air conditioning systems: A new dynamic simulation approach for energy, economic, environmental impact and thermal comfort analyses. *Energy*.
- Chow, W. K., & Yu, P. (2000). *Energy*, 1-13.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (1997). *Isı ve Kütle Transferi*. Palme Yayıncılık.
- Dullinger, C., Struckl, W., & Kozek, M. (2015). A modular thermal simulation tool for computing energy consumption of HVAC units in rail vehicles. *Applied Thermal Engineering* (78), 616-629.
- Gunsellmann, W. (2005). Technologies for Increased Energy Efficiency in Railway Systems. *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*.
- Hofstadter, R. N., Amaya, J., & Kozek, M. (2018). Energy Optimal Control of Thermal Comfort in Trams. *Energy Optimal Control of Thermal Comfort in Trams*, 812-821.
- http-1: https://tr.wikipedia.org/wiki/Demiryolu_ula%C5%9F%C4%B1m%C4%B1#cite_ref-1
- (Erişim tarihi: 10.02.2023)

http-2: https://www.icevirtuallibrary.com/page/ice-news/210-railhistory?gclid=CjwKC AjwwL6aBhBlEiwADycBIEsvnhH662CBKCCPvR1W0tGoQ_Eynl31H_fFvU NYEJJVWJ9APUFMKhoCPnkQAvD_BwE

(Erişim tarihi: 10.02.2023)

Liu, W., Deng, Q., Huang, W., & Liu, R. (2011). Variation in cooling load of a moving air-conditioned train compartment under the effects of ambient conditions and body thermal storage. *Applied Thermal Engineering* (31), 1150-1162.

Marcos, D., Pino, F. J., Bordons, C., & Guerra, J. J. (2014). The development and validation of a thermal model for the cabin of a vehicle. *Applied Thermal Engineering* (66), 646-656.

Milli Eğitim Bakanlığı. (2013). Raylı Sistemler Teknolojisi Raylı Sistem Araçları Aydınlatma ve İklimlendirme Sistemleri. Ankara.

Powell, J. P., Gonzalez-Gil, A., & Palacin, R. (2014). Experimental assessment of the energy consumption of urban rail vehicles during stabling hours: Influence of ambient temperature. *Applied Thermal Engineering*, 541-547.

Shravanth Vasisht, M., Vashista, G., Srinivasan, J., & Ramasesha, S. K. (2017). Rail coaches with rooftop solar photovoltaic systems: A feasibility study. *Energy*, 684-691.

TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü. (2017). Demiryolu Sektör Raporu 2016. Ankara: Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı.

TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü. (2019). Yük Vagon Rehberi. Lojistik Dairesi Başkanlığı.

TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü. (2022). 2021 yılı Faaliyet Raporu (s. 32-33). içinde Ankara: Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı.

TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü. (2022). 2021 yılı Demiryolu Sektör Raporu. Ankara: Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı.

Uğur, A. (2019). Investigation of the World Railway Sector Development Prospects and Turkey's Status. The Journal of Operations Research, Statistics, Econometrics and Management Information Systems.

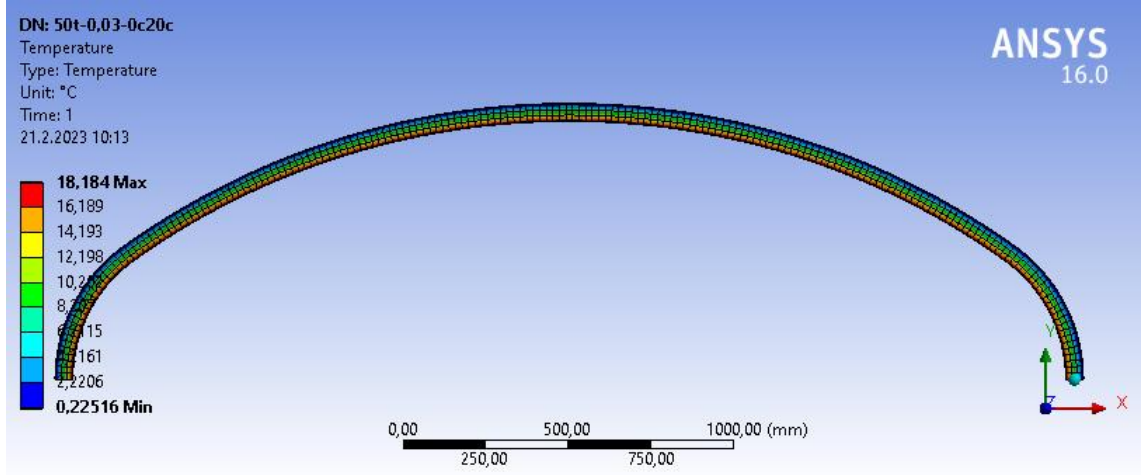
UIC. (2017). *Railway Handbook 2017*. Paris.

Vetterli, N., Menti, U. P., Sidler, F., Thaler, E., & Zweifel, G. (2015). Energy efficiency of railway vehicles. *Cisbat*, 955-960.

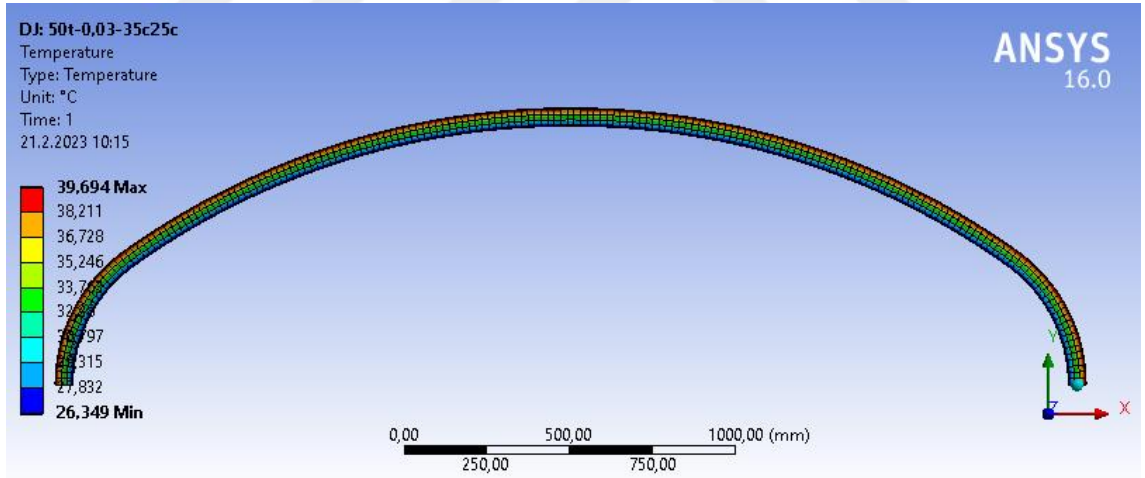


EKLER

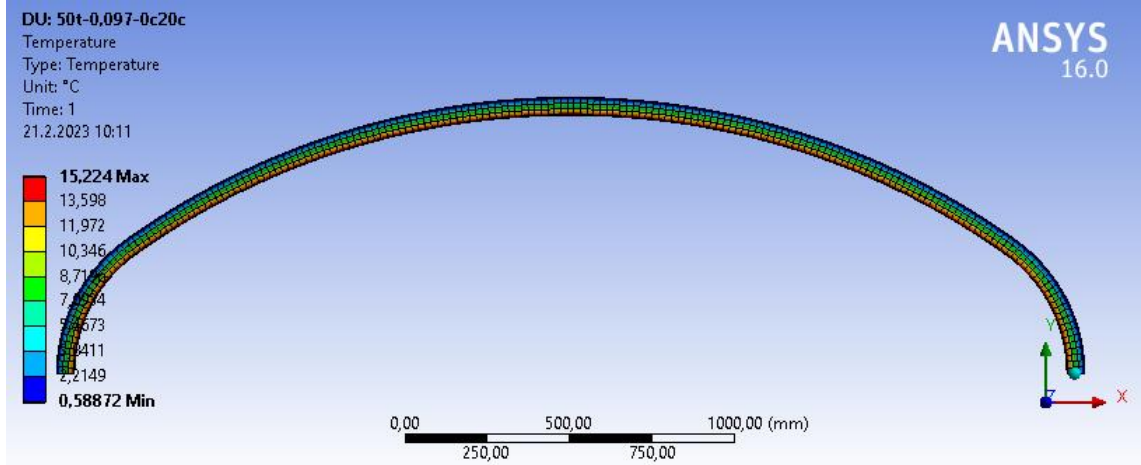
EK-1. Farklı Kalınlıklara ve Farklı Isı İletim Katsayılarına Sahip Duvarlara Ait Sıcaklık Değişimleri



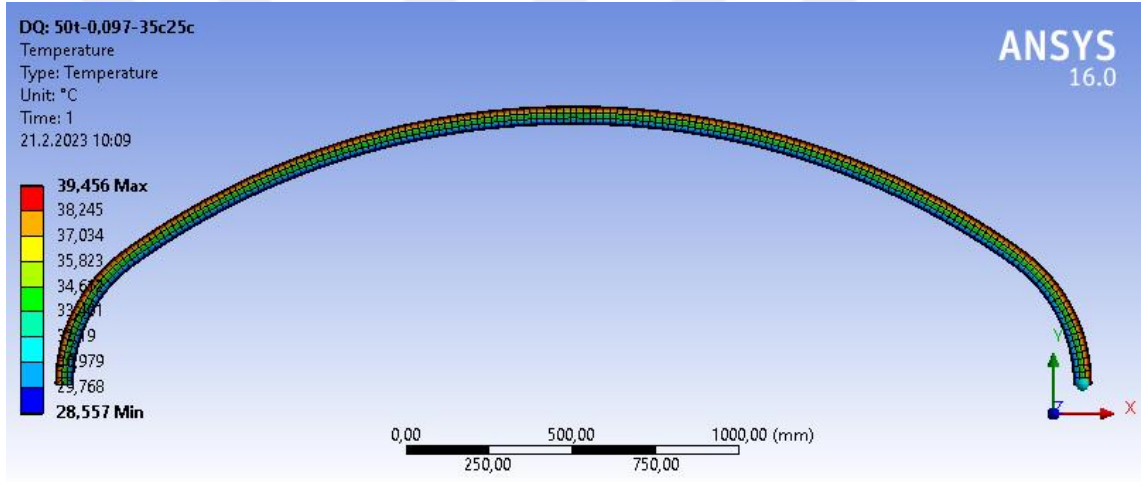
E.1.1. $T_{dış}=0^{\circ}\text{C}$ ve $T_{iç}=20^{\circ}\text{C}$ koşullarında, 50 mm yalıtım kalınlığındaki tavanın, ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan yalıtım malzemesindeki sıcaklık değişimleri



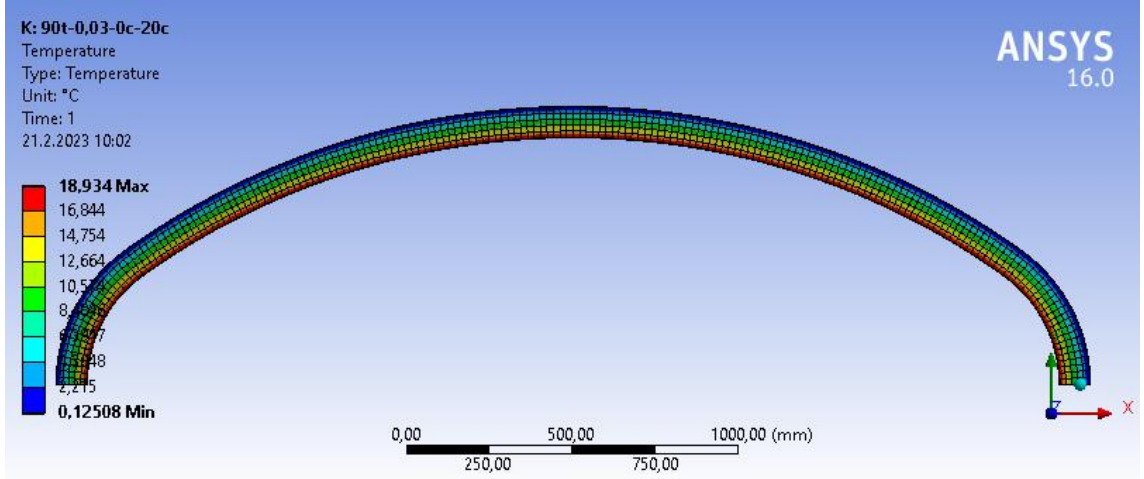
E.1.2. $T_{dış}=35^{\circ}\text{C}$ ve $T_{iç}=25^{\circ}\text{C}$ koşullarında, 50 mm yalıtım kalınlığındaki tavanın, ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan yalıtım malzemesindeki sıcaklık değişimleri



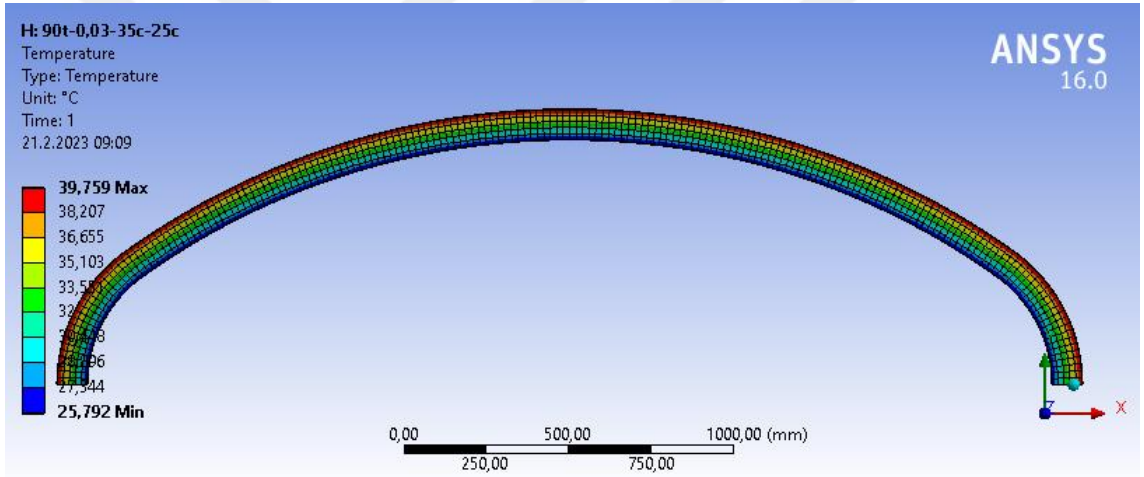
E.1.3. $T_{dış}=0^{\circ}\text{C}$ ve $T_{iç}=20^{\circ}\text{C}$ koşullarında, 50 mm yalıtım kalınlığındaki tavanın, ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan yalıtım malzemesindeki sıcaklık değişimleri



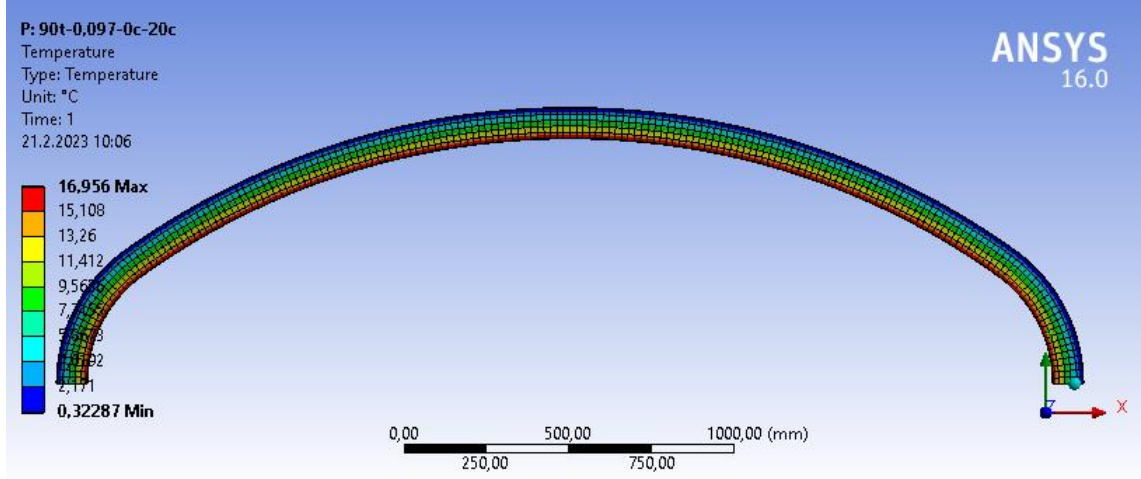
E.1.4. $T_{dış}=35^{\circ}\text{C}$ ve $T_{iç}=25^{\circ}\text{C}$ koşullarında, 50 mm yalıtım kalınlığındaki tavanın, ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan yalıtım malzemesindeki sıcaklık değişimleri



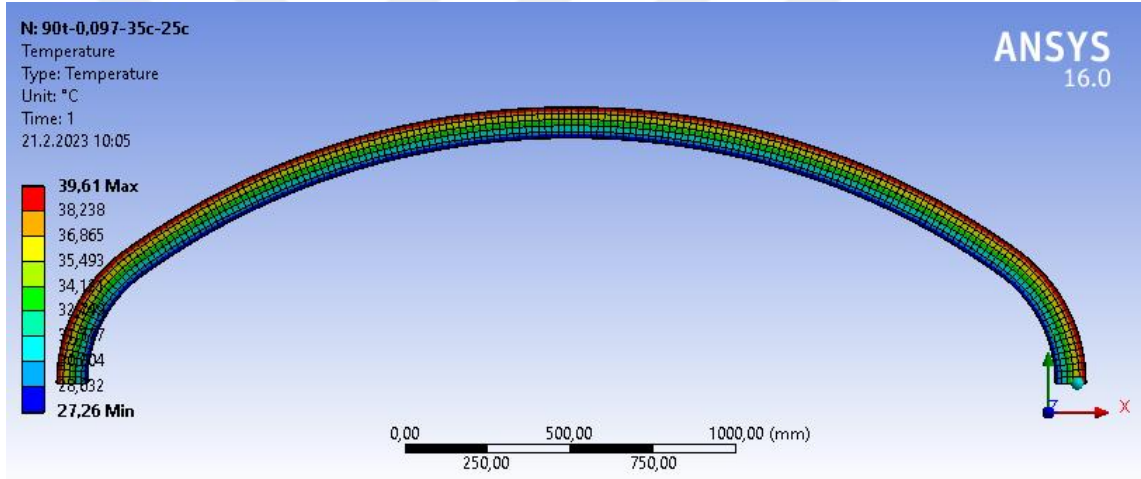
E.1.5. $T_{dış}=0^{\circ}\text{C}$ ve $T_{iç}=20^{\circ}\text{C}$ koşullarında, 90 mm yalıtım kalınlığındaki tavanın, ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan yalıtım malzemesindeki sıcaklık değişimleri



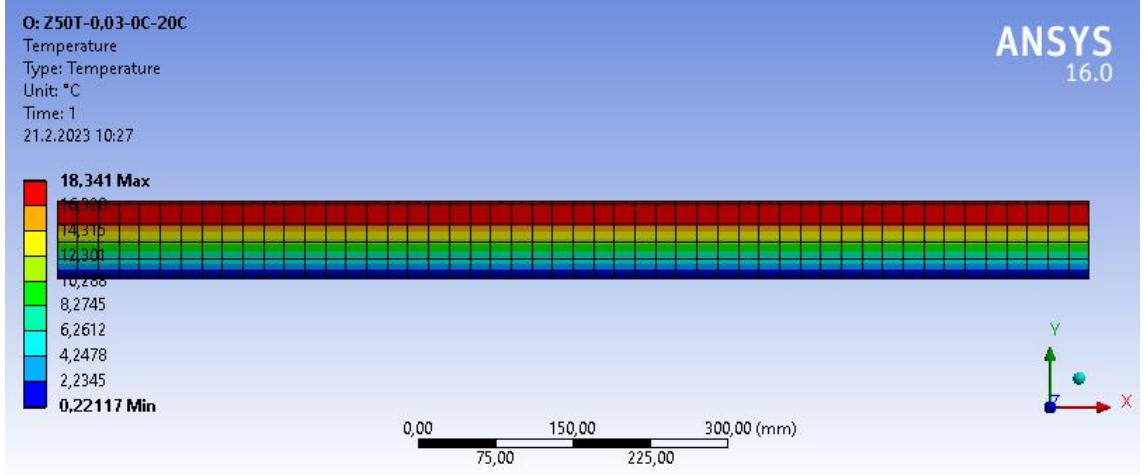
E.1.6. $T_{dış}=35^{\circ}\text{C}$ ve $T_{iç}=25^{\circ}\text{C}$ koşullarında, 90 mm yalıtım kalınlığındaki tavanın, ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan yalıtım malzemesindeki sıcaklık değişimleri



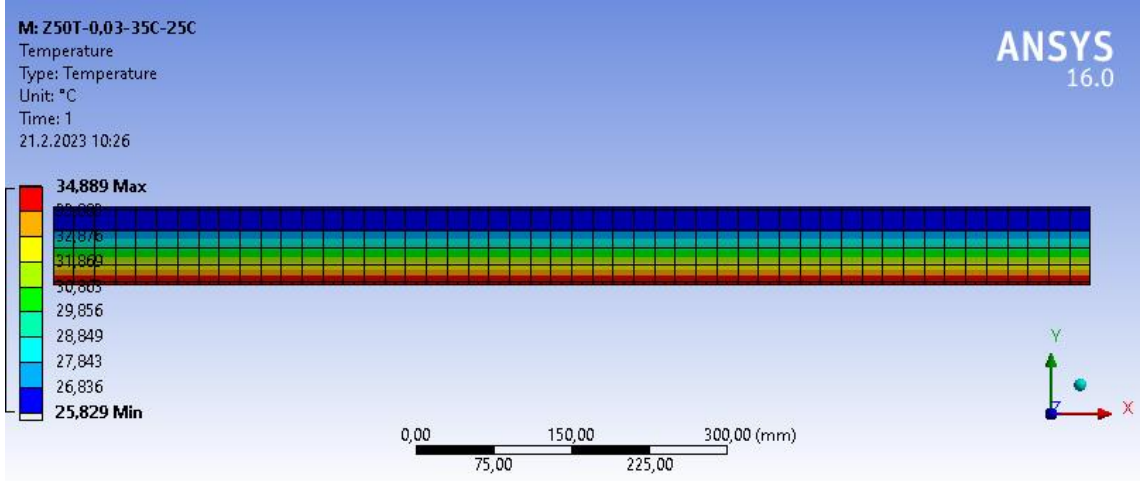
E.1.7. $T_{dış}=0^{\circ}\text{C}$ ve $T_{iç}=20^{\circ}\text{C}$ koşullarında, 90 mm yalıtım kalınlığındaki tavanın, ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan yalıtım malzemesindeki sıcaklık değişimleri



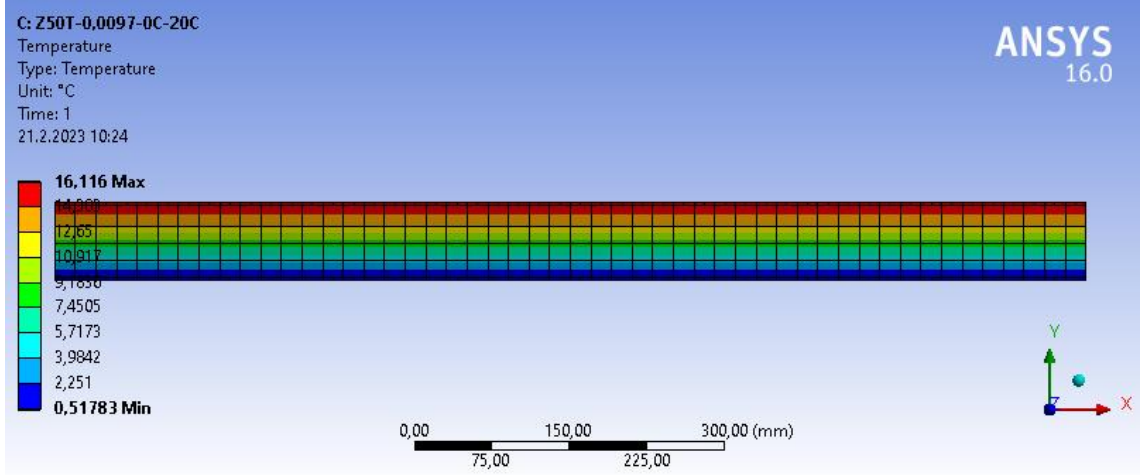
E.1.8. $T_{dış}=35^{\circ}\text{C}$ ve $T_{iç}=25^{\circ}\text{C}$ koşullarında, 90 mm yalıtım kalınlığındaki tavanın, ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan yalıtım malzemesindeki sıcaklık değişimleri



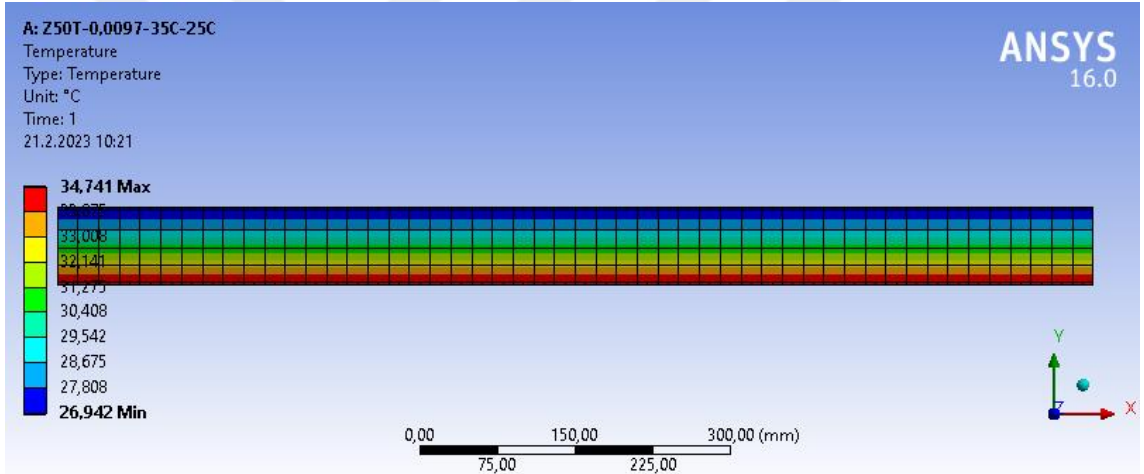
E.1.9. $T_{dış}=0^{\circ}\text{C}$ ve $T_{iç}=20^{\circ}\text{C}$ koşullarında, 50 mm yalıtım kalınlığındaki tabanın, ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan yalıtım malzemesindeki sıcaklık değişimleri



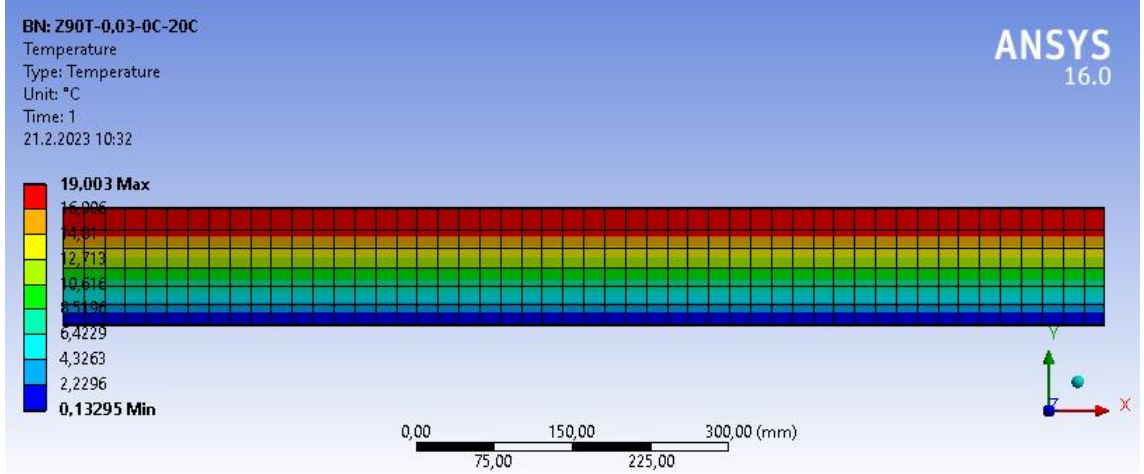
E.1.10. $T_{dış}=35^{\circ}\text{C}$ ve $T_{iç}=25^{\circ}\text{C}$ koşullarında, 50 mm yalıtım kalınlığındaki tabanın, ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan yalıtım malzemesindeki sıcaklık değişimleri



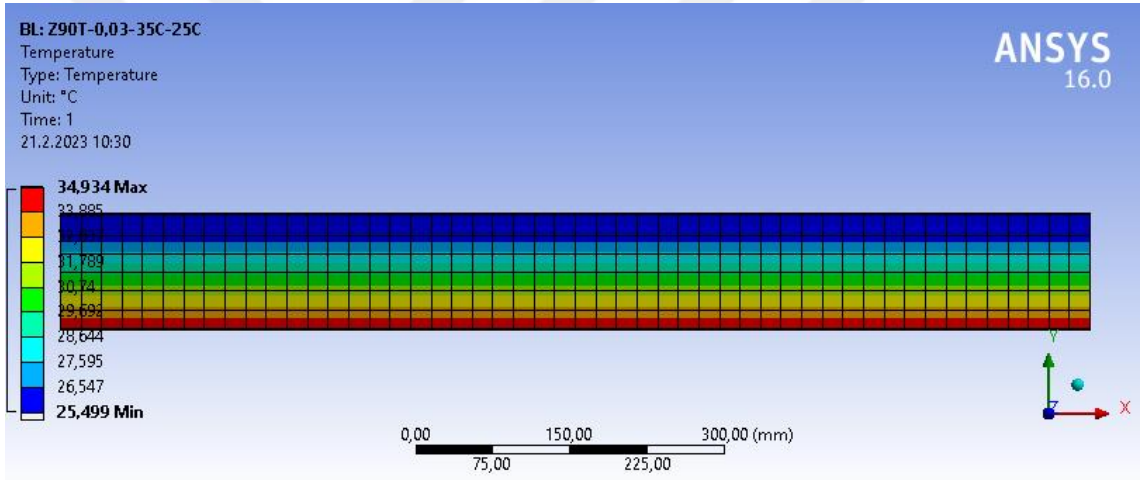
E.1.11. $T_{dış}=0^{\circ}\text{C}$ ve $T_{iç}=20^{\circ}\text{C}$ koşullarında, 50 mm yalıtım kalınlığındaki tabanın, ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan yalıtım malzemesindeki sıcaklık değişimleri



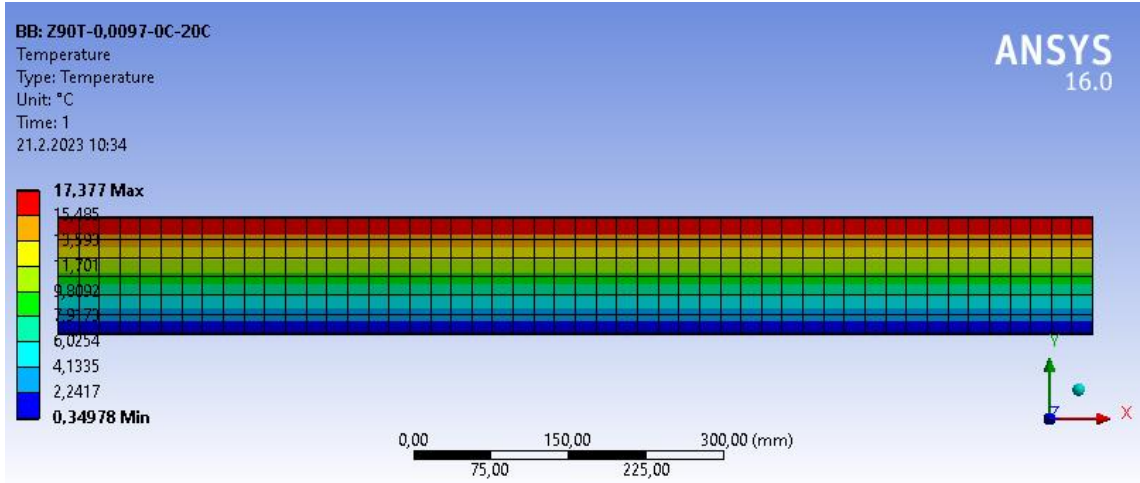
E.1.12. $T_{dış}=35^{\circ}\text{C}$ ve $T_{iç}=25^{\circ}\text{C}$ koşullarında, 50 mm yalıtım kalınlığındaki tabanın, ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan yalıtım malzemesindeki sıcaklık değişimleri



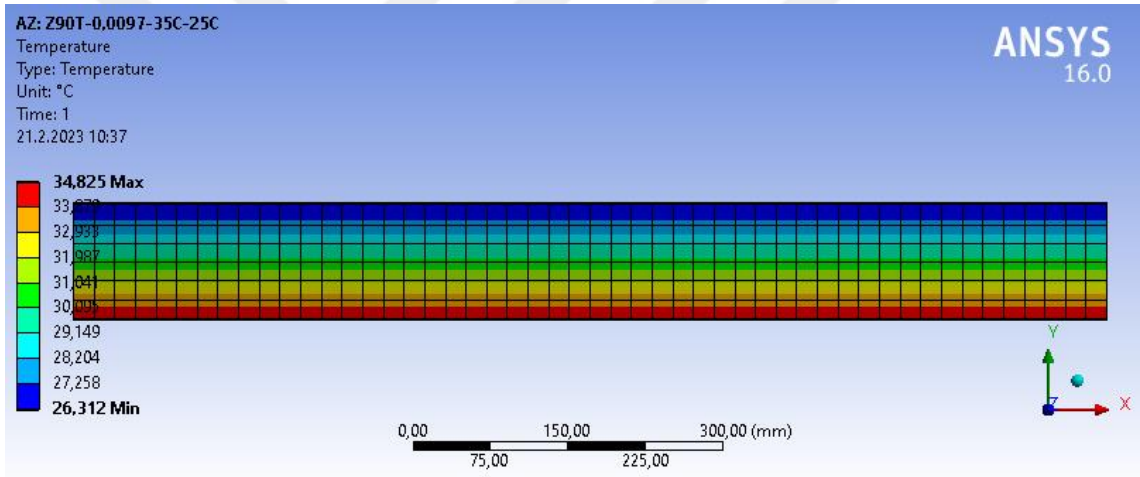
E.1.13. $T_{dış}=0^{\circ}\text{C}$ ve $T_{iç}=20^{\circ}\text{C}$ koşullarında, 90 mm yalıtım kalınlığındaki tabanın, ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan yalıtım malzemesindeki sıcaklık değişimleri



E.1.14. $T_{dış}=35^{\circ}\text{C}$ ve $T_{iç}=25^{\circ}\text{C}$ koşullarında, 90 mm yalıtım kalınlığındaki tabanın, ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK olan yalıtım malzemesindeki sıcaklık değişimleri



E.1.15. $T_{dış}=0^{\circ}\text{C}$ ve $T_{iç}=20^{\circ}\text{C}$ koşullarında, 90 mm yalıtım kalınlığındaki tabanın, ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan yalıtım malzemesindeki sıcaklık değişimleri



E.1.16. $T_{dış}=35^{\circ}\text{C}$ ve $T_{iç}=25^{\circ}\text{C}$ koşullarında, 90 mm yalıtım kalınlığındaki tabanın, ısı iletim katsayısı 0,096 W/mK olan yalıtım malzemesindeki sıcaklık değişimleri

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0002-8878-2689

Ad Soyad : Mustafa DÖNMEZ

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2018, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Raylı Sistemler Mühendisliği, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
- 2017, Proje Yönetimi ve Ar-ge Müdürü, Özben Savunma, Ar-ge Birimi

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Dönmez M., Öztürk M. M., Doğan B. (2022). Assessment of the insulation material for the train envelope. 2nd International Congress on Multidisciplinary Natural Sciences (ICOMNAS-2022), 481-492.